



Dirección
General de
Publicaciones



Arcillas

Desvelando sus secretos

FRANCHESCOLI VELÁZQUEZ HERRERA
GEOLAR FETTER



MANUALES Y TEXTOS
ciencias naturales

Arcillas

Desvelando sus secretos

Arcillas

Desvelando sus secretos

Franchescoli Didier Velázquez Herrera
Geolar Fetter



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
DIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES

2022

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

- ♦ Rectora: María Lilia Cedillo Ramírez
- ♦ Secretaria General: José Manuel Alonso Orozco
- ♦ Vicerrector de Extensión y Difusión de la Cultura: José Carlos Bernal Suárez
- ♦ Dirección General de Publicaciones: Luis Antonio Lucio Venegas

Primera edición: 2022

ISBN: 978-607-525-859-1

DR © Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

4 Sur 104, Centro Histórico, Puebla, Pue. CP 72000

Teléfono: 222 229 55 00

www.buap.mx

DR© DIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES

2 Norte 1404, Centro Histórico, Puebla, Pue., CP 72000

Tels.: (222) 246 85 59 y (222) 229 55 00, extensiones 5768 y 5769

www.publicaciones.buap.mx | libros.dgp@correo.buap.mx

Diseño de portada: Francisco González Bernal

Impreso y hecho en México

Printed and made in Mexico

ÍNDICE

Prólogo.....	6
Introducción.....	7
ARCILLAS CATIONICAS.....	8
Una morada ancestral.....	9
Antigüedad arcillosa.....	9
Un poco de historia.....	13
Definiendo a las arcillas.....	17
Conociendo el origen de las arcillas.....	19
Un poco de química.....	24
¿Dónde están las arcillas?.....	27
Conociendo las peculiaridades de las arcillas.....	29
Naturaleza arcillosa.....	32
El esqueleto de una arcilla.....	33
La unión hace la fuerza.....	35
A través de su esqueleto.....	38
¿Quién es quién en las arcillas?.....	39
Propiedades de las arcillas.....	51
Arcillas bondadosas.....	54
¿Qué hay del agua?.....	55
Saber ancestral.....	56
Maestros del calor.....	59
El astronauta.....	61
Tierra de los dioses.....	63
Pictografía de los dioses.....	66
La energía de los dioses.....	68
Remedio de los dioses.....	70
Intermediarios de la transformación.....	72
Sin olvidar.....	75
Alterando arcillas.....	76
Pilares de una arcilla.....	77
El intercambio iónico de una arcilla.....	78
Formando pilares en una arcilla.....	80
ARCILLAS ANIÓNICAS.....	91

Las arcillas destacadas.....	92
La naturaleza de las hidrotalcitas.....	94
El esqueleto de una hidrotalcita.....	96
Construyendo una hidrotalcita.....	99
Propiedades de las hidrotalcitas.....	104
Aplicando hidrotalcitas.....	105
La hidrotalcita en el mundo nano.....	107
Formando vínculos con la hidrotalcita.....	119
Las nano-hidrotalcitas, un futuro por descubrir.....	110
Epílogo.....	112
Bibliografía.....	113

PRÓLOGO

En un inicio cuando la Tierra recién comenzaba, las montañas crecieron y le dieron forma. Sus albores se enriquecieron por el polvo que la lluvia y las rocas generaron; un polvo que la humanidad nombró “arcilla” y que la acompañó desde sus inicios, siendo el precursor principal de su desarrollo, hasta nuestros días.

INTRODUCCIÓN

Desde el principio de la humanidad, la tierra ha formado una parte importante de su vida cotidiana proveyendo alimentos y materiales que le permitieron a la humanidad construir sus hogares y alimentarse. Así, en la edad temprana, la humanidad descubrió que podía dejar sus huellas en la tierra húmeda y que ésta las recordaría en un gesto de compromiso, conmemorando que siempre estarían vinculadas.

La Tierra, un planeta que ha existido desde hace millones de años y que en los días actuales aún es posible jactarse con su magnificencia, ha permitido conocerla y descubrir con el tiempo que se forma por muchos elementos químicos que le dan vida y belleza a los diversos entornos que la conforman, desde los grandes mares hasta los grandes continentes, formando los más grandiosos escenarios que los ojos de la humanidad puede ver. Ha sufrido muchos cambios su superficie con el paso del tiempo, gracias a la erupción de los volcanes y las lluvias, lo que ha originado diversos minerales que se encuentran dispersos por todo el planeta, pero de entre toda esta diversidad encontramos uno muy particular: las arcillas.

Las arcillas son minerales que encontramos abundantemente en la naturaleza, siendo materiales muy importantes debido a su gran utilidad en diversos campos. Se han empleado en la preparación de porcelanas y utensilios domésticos, y en la obtención de vidrios, además de otros objetos de uso cotidiano. Pasando por diversas culturas antiguas como la mexicana, que empleaban a las arcillas para elaborar diversas vasijas, además de ser un material indispensable de su infraestructura. Así, hasta llegar a los días actuales, han encontrado un lugar muy importante, funcionando como materia prima en la elaboración de diversos productos del sector industrial, como lo son el cemento, vidrio y cerámicos. Efectivamente, sin importar qué tanto se prescindiera de ellas, se podrán encontrar en todas partes.

ARCILLAS CATIONICAS

Una morada ancestral

El suelo, tal y como lo conoce la humanidad, formó una parte vital de las civilizaciones antiguas. Una de ellas, quizá la más importante que se conoce, construyó diversos complejos arquitectónicos, de los cuales aún es posible maravillarse. Los mexicas (también conocidos como Aztecas) construyeron una ciudad que era innovadora en diversos sentidos. El uso del suelo les confirió grandes ventajas para poder desarrollar las estructuras que formaron la gran ciudad de Tenochtitlán. Además, empleaban grandes porciones de suelo cuando se requería ampliar los templos, con el fin de sepultarlos completamente para construir la nueva estructura encima de ellos, conservando en el tiempo, los restos de las antiguas estructuras. Por otro lado, el suelo también era empleado para aplanar los muros donde se colocaban pinturas de diversas actividades y deidades, que eran representados en sus murales (López Luján *et al.*, 2003). A pesar de que el suelo era utilizado en dos aplicaciones diferentes, pero dentro de la misma construcción, tenía una característica en común, estaba constituida por un material muy particular, que en estos tiempos conocemos como arcilla (Figura 1).



Figura 1. Complejo arquitectónico mexica construido por arcillas.

Antigüedad arcillosa

Alguna vez se han preguntado: ¿de qué está hecho el suelo? y ¿por qué llega a tener diferente apariencia y diversos usos?

Para responder a estas interrogantes, es necesario recurrir a la ciencia tradicional, la cual se basa en el mundo que se puede observar y está al alcance de todos, es decir, involucra todo lo que se conoce: animales, montañas, plantas, rocas y por supuesto, los patrones climáticos. Así, la química y la física, que forman parte de la ciencia tradicional o mejor conocida como ciencias naturales, permitieron establecer principios más precisos y viables del comportamiento de los fenómenos que formaron el mundo alrededor de la humanidad. Si se hiciera una distinción entre estas ciencias, se puede referir a la física como la ciencia que se ocupa de los materiales que no reaccionan, es decir, que son sometidos a fuerzas esencialmente mecánicas, mientras que, la química es la ciencia a la que se le encomendó la tarea de comprender las interacciones y transmutaciones de la materia, según las afinidades de átomos e iones que la forman, logrando con ello, una comprensión más detallada de lo que sucede a nuestro alrededor.

A pesar de los grandes esfuerzos de las ciencias naturales por describir los fenómenos de nuestro entorno, la naturaleza sigue sorprendiendo con muchas complicaciones multidimensionales y, aunque se ha logrado un gran progreso utilizando los descubrimientos de la química y la física en la comprensión de estos fenómenos, aún quedan muchísimos más que faltan por descubrir. No obstante, muchísimos de los fenómenos que suceden en todo el entorno, ocurren precisamente en la biosfera del planeta Tierra, generando, en diversas ocasiones, varias dificultades para su estudio.

Así, dentro de la biosfera, una de las principales contrariedades en la actualidad, es el estudio de la superficie terrestre, es decir, el suelo en el que realizamos todas nuestras actividades, donde crecen las plantas y donde cae la lluvia. En él, se pueden encontrar diversos materiales que, desde hace varios miles de años, han sido empleados por los seres humanos como materia prima para la construcción de múltiples objetos y viviendas. Uno de los materiales más abundantes en todo el entorno, son las arcillas.

Las arcillas han sido utilizadas desde la antigüedad, y han sido partícipes de diversas culturas y religiones, empleándolas para describir la creación del ser humano. Por ejemplo, en África, los egipcios desarrollaron diversas teorías para describir la creación de la humanidad, una de ellas nos relata cómo el dios cabeza de carnero “*Jnum*” (el que moldea) fue el responsable de la creación de la humanidad. Este dios, que simbolizaba la fertilidad, moldeó a los humanos (Figura 2), a los animales y a otros dioses con su torno de alfarería empleando

lodo proveniente del río Nilo, creando de manera única a cada persona, hasta que llegó un momento en que se cansó de esta labor, entonces rompió su torno y depositó un pedazo en el vientre de cada mujer, para que así fueran fértiles y pudieran tener hijos. Estas acciones se pueden leer en parte del himno dedicado a este dios (Cano Marín, 2018):

“Él ha moldeado a los hombres y a los dioses, ha dado forma a las fieras y creado a las vacas”.



Figura 2. Dios egipcio moldeando el hombre en arcilla para su creación.

En América, en la región sur de México, la mitología maya descrita en el *Popol vuh*, nos relata cómo los creadores y formadores, Tepeu y Gucumatz, crearon al primer hombre de lodo (Figura 3) y lo destruyeron ahogándolo debido a que no podía hablar, pensar, caminar, ni tampoco mantenerse en pie, además de que el agua disolvía su cuerpo. Esta descripción se encuentra en el extracto del texto del *Popol vuh* (De la Torre Villar, 1998):

“De tierra, de lodo hicieron la carne [del hombre], pero vieron que no estaba bien, porque se deshacía, estaba blando, no tenía movimiento, no tenía fuerza, se caía, estaba aguado, no movía la cabeza, la cara se le iba para un lado, tenía velada la vista, no podía ver hacia atrás. Al principio hablaba, pero no tenía entendimiento. Rápidamente se humedeció dentro del agua y no se pudo sostener”.

Asimismo, los mexicas también tenían su propia visión de la creación del hombre, en la que Quetzalcóatl es el protagonista, como se puede leer del extracto del Códice Chimalpopoca: *Anales de Cuauhtitlán* y *Leyenda de los Soles* (Feliciano Velázquez & León-Portilla, 1992):



Figura 3. Tepeu y Gucumatz, dioses mayas de la creación del hombre.

“Luego los juntó, los recogió e hizo un lío, que inmediatamente llevó a Tamoanchan. Después que los hizo llegar, los molió la llamada Quilachtli: esta es Cihuacóhuatl, que a continuación los echó en un lebrillo precioso”.

Otras versiones describen que los huesos fueron mezclados con tierra y amasados para crear a la humanidad. No obstante, algunas versiones describen que los huesos se trituran y moldean, como un alfarero a sus vasijas (Cordero López, 2005):

“[...] y ella, Quilaztli, molió los huesos sobre un metate, los amasó, tomó porciones de la masa y les dio la forma humana y la puso después en una vasija dotada de hermosura, modelada en barro”.

Con estos registros, se puede caer en la cuenta de que la arcilla sigue siendo una parte importante de los mitos antiguos.

Por otro lado, dentro de la religión se tiene alusión a las arcillas, un ejemplo claro es la religión cristiana, pues en la Biblia se encuentra una mención a las arcillas: “Dios creó al hombre con el polvo de la tierra”, lo que lleva a pensar que la humanidad considera a las arcillas como una parte muy importante de ella.

Reuniendo todos estos mitos y creencias, que hablan de la creación del ser humano, se puede inferir que la humanidad es un producto de la tierra, es decir, hijos de la propia tierra. Por tanto, se puede deducir que el desarrollo de estas historias le permitió al ser humano de la antigüedad generar un sentido cultural de pertenencia al suelo donde viven, en contraposición a la sensación de aisla-

miento que podría esperarse en un mundo en el que la supervivencia era difícil para esas culturas.

Dado el especial vínculo que el ser humano adoptó con las arcillas, poco a poco desde la antigüedad, los primeros humanos descubrieron su utilidad, y comenzaron a emplearlas en su vida cotidiana. Los recipientes más antiguos descubiertos son las figurillas y las vasijas elaboradas con arcillas. Además, se sabe que también se emplearon para construir edificaciones, siendo una parte importante de los materiales de construcción como el tapial, el adobe y posteriormente el ladrillo, que, hasta en la actualidad, su uso ha sido vital para las construcciones. De la misma manera, las arcillas encontraron otro uso diferente a la construcción, siendo utilizadas como soporte de escritura, miles de años antes de la invención del papel.

Un poco de historia

Los antiguos mexicanos tenían un conocimiento empírico de las propiedades de las arcillas, que les permitió volverse maestros en la alfarería, generando vasijas y esculturas de impresionante detalle. Hoy en día se sabe que utilizaban una técnica conocida como moldeado, por la cual, a través de la rotación de una masa arcillosa sobre un soporte móvil, situado sobre una base fija, generaban piezas de diversas formas y tamaños que hoy en la actualidad nos siguen maravillando.

Conocer los inicios del uso de las arcillas por los seres humanos y más en específico de la alfarería, la cual, es el uso más importante que se le dio en la antigüedad, sigue siendo un misterio para los estudiosos actuales. Lo que sí se puede inferir es que en varios lugares del planeta surgió de manera independiente, caracterizándose principalmente por el tipo de arcilla empleada y por las técnicas de cocción para endurecerla.

En los primeros años de la humanidad, en la época del Paleolítico inferior, se comenzaron a percibir las características de las arcillas, al observar que las huellas e incisiones quedaban inalteradas sobre el barro después de que éste se había secado. Esto, probablemente, dio pie a los inicios de la alfarería, la cual, comenzó a desarrollarse sin cocción, es decir, sin ayuda del fuego para endurecerla; y posteriormente, al descubrirse el fuego (o al poder manipularlo), la humanidad conoció otra aplicación de las arcillas que sigue vigente hasta nuestros días.

Los seres humanos comenzaron a usar el barro que encontraban para formar figuras que representaban a sus deidades, unas de las cuales, las más conocidas,

son las nombradas “Venus paleolíticas” (Silvan, 1963), que fueron descubiertas en 1925 en la República Checa y datan de entre los años 29000 y 25000 a.C.

No obstante, la humanidad no se detuvo solo con la elaboración de figurillas, tiempo después comenzó a darle un uso más práctico a las arcillas, transformándolas en vasijas para contener líquidos u otros alimentos, de los cuales, los ejemplos más antiguos son las vasijas chinas, que datan del año 20000 a.C. Posteriormente, las vasijas se emplearon en Japón cerca del año 14000 a.C. y más tarde, entre los años 11000 y 10000 a.C., se pueden encontrar restos de alfarería en África y Sudamérica (Wilhide & Hodge, 2017). Después, la cerámica comenzó a expandirse por todo el mundo apareciendo en Mesopotamia y en Siria cerca del año 6000 a.C., extendiéndose a otras zonas de Asia Menor, como Palestina e Irán cerca de los años 5000 a 4500 a.C., o en zonas como Tesalia, Anatolia y Chipre entre los años 5200 y el 4500 a.C. (Silvan, 1963). También, no hay que olvidar un importante hallazgo realizado en el año de 1974, de las más de 8000 estatuas de guerreros y caballos hechos de arcilla, encontrados cerca de la ciudad de Xi’an, en China, los cuales representan el ejército del autoproclamado primer emperador de China, Qin Shi Huang. Estas esculturas se elaboraron con el fin de que fueran la escolta que acompañara al emperador en su otra vida (Figura 4).



Figura 4. Guerreros de terracota (arcilla) que acompañaron al emperador chino Qin Shi Huang en su tumba.

Centrándose en el continente americano, se encontraron figurillas de arcilla llamadas “Venus de Valdivia”, cerca de los años 3500 a.C., procedentes de las costas de Ecuador, seguidas de las figurillas del área andina y de las “cabecitas” de la cultura Olmeca en México (Patiño-Puente, 2010).

Desde su descubrimiento, poco tiempo transcurrió para que la alfarería fuera adquiriendo colores y formas muy variadas, a las cuales se les impregnaban una mezcla de hojas y cortezas para adquirir una coloración y, a su vez, un poco de impermeabilidad, desarrollando así, los primeros vidriados vegetales de la historia.

Todos estos desarrollos, en objetos y vasijas, fueron de vital importancia para el desarrollo de la humanidad, pero también existía la necesidad de resguardarse de las inclemencias de la naturaleza. Desde que el ser humano abandonó las cuevas, que servían de refugio para cubrirse de los fenómenos naturales y de otras contrariedades a su alrededor, tuvo la necesidad de utilizar los elementos disponibles a su alrededor para poder sustituir a las cuevas. Uno de los primeros materiales que se utilizaron para la construcción, cerca del año 3000 a.C., fueron las materias orgánicas procedentes de los vegetales, que eran manteados con barro, mismas que, junto con los dólmenes de grandes piedras, formaron las primeras estructuras donde el ser humano se pudo asentar (Patiño-Puente, 2010).

Más a detalle, los materiales empleados en la construcción se han mantenido vigentes desde la antigüedad, entre ellos se encuentran los tapiales y morteros (8000 a.C.), los adobes (5000 a.C.), los hormigones (4500 a.C.) y los ladrillos (3000 a.C.), que utilizan los recursos que están en el entorno y entre los que se pueden encontrar a las arcillas (Varas *et al.*, 2007). Los mismos egipcios, que son considerados como los posibles inventores del ladrillo, fueron los que le dieron a este material una gran importancia para la construcción, produciéndolo en masa con el fin de que las ciudades del país fueran cercadas con la construcción de murallas de ladrillo crudo, los cuales eran secados al sol y así protegerse de los pueblos enemigos.

La historia nos muestra que la humanidad ha estado en continuo uso del suelo para satisfacer algunas necesidades de la vida diaria, haciendo de las arcillas un material único que tiene una estrecha relación con la humanidad.

Dentro de este contexto, se puede considerar que la vida sobre la Tierra se inició y desarrolló gracias a las arcillas, ya sea en forma estática como la flora, o en forma dinámica como la fauna y ha sido de gran ayuda para la humanidad.

Durante el siglo XVIII, se comenzó a adquirir el conocimiento de la naturaleza y sistematización de las propiedades de las arcillas, pero fue hasta el siglo XIX cuando se generó un gran avance con el surgimiento del microscopio petrográfico. No obstante, mucho tiempo pasó hasta que se esclareció que las arcillas tienen diferentes composiciones químicas y estructuras. Así, aún hasta la década de 1920 se creía que eran sólidos amorfos, pero fue hasta 1923 que Hadding, y en 1924 Rinne, publicaron los primeros análisis de difracción de rayos X de los minerales de arcillas, mismos que no obtuvieron mucha difusión o interés en general (Bensoain, 1985). Muchos años después, hasta 1940 se comenzaron a desarrollar investigaciones más detalladas de estos materiales; se identificaron varios tipos de arcillas con distintas composiciones, lo cual propició el desarrollo de trabajos que se enfocaron en poder clasificar a estos minerales. Esta misma tendencia continuó por varios años, hasta que la identificación estructural y química, así como la determinación de las propiedades y características de los varios tipos de arcillas, solo se hizo posible a partir de la década de 1960, debido al desarrollo de las técnicas de caracterización de materiales más sofisticadas, entre las que se encuentran la difracción y fluorescencia de rayos X, la difracción de electrones, la microscopía electrónica de barrido y transmisión, el análisis térmico diferencial, la espectroscopía de energía dispersiva, la espectroscopía de emisión y absorción atómica, así como muchas otras que en la actualidad se han desarrollado para obtener una mejor comprensión de los materiales.

En los últimos años, gracias al desarrollo de técnicas sofisticadas de investigación y a un número cada vez mayor de investigadores en este tema, se ha generado una gran cantidad de información que cubre los más variados campos de la mineralogía de las arcillas. Además, una importante contribución al entendimiento de estos minerales se debe a los estudios teóricos de simulación estructural, composicional y otros, que se han desarrollado para complementar y sustentar las teorías experimentales. Aún más, estas técnicas computacionales promueven el conocimiento de la síntesis de los minerales en variadas condiciones de meteorización, que a futuro podrían simular incluso la formación de arcillas en otros planetas, como es el caso de Europa, el sexto satélite natural del planeta, Júpiter, en el cual, se han detectado arcillas en su superficie helada, las cuales han sido el tema central de diversos estudios para poder identificar su origen (Jia-Rui, 2013).

Definiendo a las arcillas

Cada persona tiene un significado diferente para la palabra arcilla; cada quien la define dependiendo del uso que le dé y la relevancia que tenga en su vida cotidiana.

Los antiguos mexicanos no conocían el concepto de arcilla, describían su entorno con diferentes palabras, un ejemplo claro es el barro, el cual lo usaban para la alfarería y para la construcción que, de acuerdo con la reimpresión hecha en 1910 del “Vocabulario en lengua castellana y mexicana” de Fray Alonso de Molina, se conocía como *Zóquitl*, el cual hacía referencia al lodo o lodazal. Así, la descripción del entorno juega un papel importante para comprender lo que se observa y depende desde el punto de vista de quién lo esté observando.

Para un agricultor, las arcillas son el entorno donde crecen la mayoría de las plantas. El alfarero, la conoce como la materia prima de sus obras desde hace más de 4000 años (Figura 5). Un editor, la conoce por lo que le da suavidad a la superficie del papel en impresiones de alta calidad. En el área médica, puede ser el material que da alivio a algún mal gastrointestinal, mientras que, para un químico, es un material multifuncional con grandes expectativas en todos los campos dónde necesite aplicarla, definiéndola como una mezcla homogénea de silicatos de aluminio hidratados.



Figura 5. Alfarero moldeando arcillas para la obtención de vasijas y otros utensilios.

La palabra arcilla proviene del latín *argilla* y ésta del griego *argos* o *argilos*, asignado por el color blanco del material que es usado en la cerámica (Bensoain, 1985).

Inicialmente fue definida con base en el tamaño de sus partículas. En geología, las arcillas son consideradas como minerales con tamaño de partículas menores a 4 μm , mientras que, en ciencia de coloides, las definen con un tamaño de partículas menores a 1 μm . Estas definiciones corresponden al siglo XIX, en donde solo disponían de microscópicos ópticos de investigación. No obstante, una definición más aceptada (Mukherjee, 2013) propuesta por la *Joint Nomenclature Committee* (JNC), la *Association Internationale pour l'Etud des Argiles* (Asociación Internacional para el Estudio de las Arcillas, AIPEA) y la *Clay Minerals Society* (CMS), en 1995 es:

“Material formado naturalmente compuesto principalmente de minerales de partículas finas, que generalmente es plástico con un contenido de agua adecuado y se endurece cuando se seca u hornea”.

Cada parte de esta definición se puede interpretar individualmente, separando cada frase o término importante:

a) “Material formado naturalmente”. Para que un material sea considerado como una arcilla debe formarse naturalmente.

b) “Minerales”. En efecto, las arcillas están compuestas por diversos minerales, es decir, están compuestos principalmente por materiales inorgánicos, ejemplos de ello, son los lodos, barro, adobe, tapia, entre otros. Cuando se tiene un material que se compone principalmente de materiales orgánicos no se puede considerar como una arcilla.

c) “Partículas finas”. Se conoce que las arcillas pueden tener diferentes tamaños de partículas, pero una característica importante es que deben presentar tamaños por debajo de los 2 μm .

d) “Plástico con un contenido de agua adecuado”. Como se ha observado en las distintas épocas de la evolución de la humanidad, cuando se les agrega agua a las arcillas se forma una masa plástica pegajosa, es decir, se puede moldear a conveniencia para formar diversos objetos de uso cotidiano, o para crear obras de arte.

e) “Endurece cuando se seca u hornea”. Las arcillas, cuando se dejan secar al aire, se vuelven duras y quebradizas; este aspecto se puede observar después de que llueve, donde la tierra arcillosa, forma pequeñas hojuelas que pueden llegar

a ser muy duras, pero si se trituran vuelven a tomar la forma inicial, es decir, antes de que fuera humedecida con la lluvia. El caso contrario ocurre cuando la arcilla se moldea y se hornea; entonces se tritura y la arcilla no regresa a su estado original, debido a que sufrió un cambio químico por efecto del horneado.

A pesar de que esta definición es la más aceptada, se puede definir a las arcillas desde un punto de vista particular de cada profesión; petrográficamente se definen como una gran cantidad de materiales sedimentarios, de granulometría fina y mineralógicamente poco definidos (Bensoain, 1985); químicamente las definimos como una serie de sustancias que se identifican con el caolín y son de composición variable, con contenidos de silicio, aluminio o hierro, además de elementos alcalinos y alcalinotérreos.

En este momento se debe hacer una distinción. Como ya se ha descrito, las arcillas son de origen natural, pero ¿qué pasa con las arcillas que se obtienen en un laboratorio?, es decir, sintéticas. Para dar respuesta a esta interrogante existe una distinción de términos, las arcillas, son naturales de partículas menores a 2 μm , con filosilicatos como constituyentes principales, son plásticas y se endurecen al secarse, mientras que un término poco usual “minerales de arcilla” permite englobar arcillas naturales y sintéticas, sin tamaño de partícula definido, no es necesario que presente filosilicatos como constituyente principal, son plásticas y se endurecen al secarse. Además, actualmente, con el desarrollo de arcillas sintéticas de composiciones químicas muy diferentes, hace que algunos tipos de arcillas no presenten características plásticas.

Para fines prácticos, en este libro se consideran los términos arcilla, arcillas minerales y minerales de arcilla como uno solo, es decir, como arcilla.

Conociendo el origen de las arcillas

Las antiguas épicas de los mexicas proporcionan una manera de ver la creación de la Tierra, como lo refiere el extracto del texto *Épica Náhuatl* (Garibay, 2018):

“El mundo está lleno de agua, cuyo origen nadie sabe. Por el agua iba y venía el gran Monstruo de la Tierra. Cuando la vieron los dioses, uno a otro se dijo: es necesario dar a la Tierra su forma. Entonces se transformaron en dos enormes serpientes. La primera asió al gran Monstruo de la Tierra desde su mano derecha hasta su pie izquierdo, en tanto que la otra serpiente, en que el otro dios se había mudado, la trababa desde su mano izquierda hasta su pie derecho (Figura 6). Una

vez que la han enlazado la aprietan, la estrechan, la oprimen, con tal empuje y violencia, que al fin en dos partes se rompe. Suben la parte inferior y de ella hacen el cielo; bajan la parte superior y de ella forman la Tierra”.



Figura 6. Dios mexica creando la Tierra (Códice Vaticano B, lámina 26).

Este fragmento, que en principio muestra la formación de la Tierra, permitió a nuestros antepasados tener una idea de cómo se había formado el suelo que pisaban, pero no todo termina ahí.

Se ha comprendido qué son las arcillas y cómo la humanidad las ha empleado a lo largo de toda su historia; sin embargo, cuando las personas llegaron, ellas ya se encontraban presentes en el suelo, formando parte del entorno natural, en diferentes proporciones, formando parte de los cerros y montañas, de los bosques y campos. Con todo esto se puede tomar en cuenta que el suelo está constituido de diferentes fases que permitieron obtener a las arcillas, como se observa en la Figura 7 (Bensoain, 1985). La fase líquida, se puede observar en los ríos, cuando la gente usa la expresión “el río está revuelto”, es decir, que el agua va mezclada homogéneamente con los sedimentos que hay en el fondo del río o en el caudal de este. Otro ejemplo de la fase líquida se encuentra en las olas del mar que llegan a la playa, es decir, cuando el agua entra en contacto con la arena de la playa; el agua se mezcla con la arena y se observan las partículas de arena moviéndose con el agua.

Por otro lado, la fase gaseosa es mucho más difícil de observar a simple vista; algunas personas, cuando están cuidando su jardín, usan la frase de “airrear

la tierra”, esto con el fin de crear conductos por los que el aire, el agua y los nutrientes puedan ingresar al suelo, evitando la compactación del terreno. Esta acción permite que el aire de la atmósfera ingrese al interior del suelo y pueda ser aprovechado por las raíces de las plantas y los microorganismos que habitan en él; por tanto, esta zona, adquiere una nueva atmósfera que está influenciada por los microorganismos y otros materiales presentes en ella, generando así, la fase gaseosa del suelo. Finalmente, la fase más conocida del suelo es la fase sólida, la cual, se observa en todo el entorno y del que forman parte las arcillas.

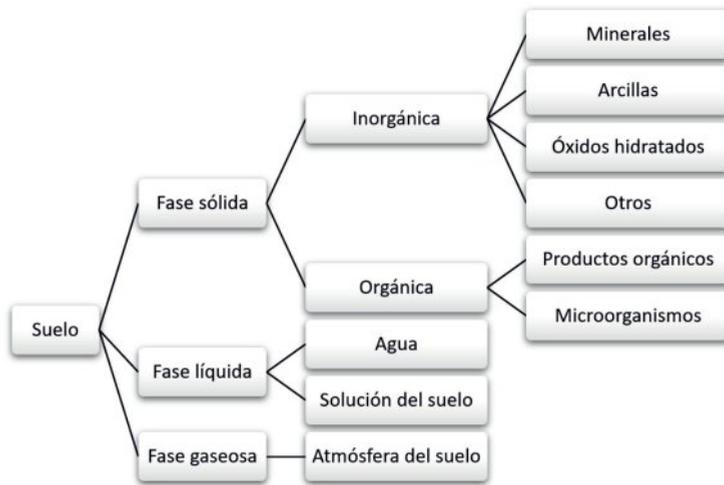


Figura 7. Composición del suelo en sus distintas fases.

Actualmente se sabe que las arcillas contenidas en el suelo pueden provenir de tres fuentes diferentes (Mukherjee, 2013):

- Por un fenómeno conocido como *herencia*, que ocurre cuando las rocas grandes se desintegran poco a poco y el producto de esta desintegración son partículas más pequeñas de la roca inicial, por lo que, el sedimento formado presenta las mismas características de la roca inicial, es decir, no sufre un cambio químico, solo un cambio en el tamaño de partícula.
- A través de la *neoformación*, esto es, que las arcillas se pueden obtener a partir de otros minerales o materiales amorfos mediante reacciones químicas.
- Por *transformación*, que consiste principalmente de la transformación de los otros dos fenómenos, es decir, la transformación de la *herencia* y de la *neoformación* por una

reacción química.

Para conocer un poco más a fondo de estos procesos, hay que remontarse a los inicios de la formación del planeta, es decir, cuando el planeta Tierra se encontraba en una edad muy temprana estaba compuesto principalmente de magma a altas temperaturas; posteriormente la Tierra se comenzó a enfriar y formar las primeras porciones de suelo, conteniendo a los primeros minerales. A partir de este suceso, solo quedó una fuente para generar rocas: los volcanes y, claramente el interior de planeta. Pero ¿qué se necesita para tener minerales tan diversos? Cuando los flujos de magma son expuestos a abundantes recursos hídricos a bajas temperaturas, se vuelven inestables en un sentido químico, formando nuevos minerales.

La principal fuente de los minerales arcillosos en cualquier entorno natural, son las rocas sedimentarias de grano fino, algunas rocas sedimentarias más gruesas y rocas metamórficas, que pasan por el proceso de *neoformación* a través de la meteorización y alteración hidrotérmica (interacción agua-roca a 100–250 °C).

Muchas arcillas, sino es que todas, son el resultado de la interacción de soluciones acuosas con las rocas a través de un proceso de disolución y recristalización para formar y transformar los minerales arcillosos. Particularmente las arcillas no son estables en ambientes anhidros, por lo que la proporción de agua que interactúa con los minerales determina la velocidad, tipo de reacción química y, por tanto, el tipo de mineral de arcilla formado. Si se presenta una gran cantidad de agua por lluvias o por el flujo de agua, mayor será la cantidad de disolución de las rocas que se producirá. Durante este proceso, ciertos elementos se disuelven y otros permanecen en estado sólido en el esqueleto de la roca alterada. Después de este proceso, se depositan en una cuenca sedimentaria como sedimentos pelíticos, en donde se transforman en rocas pelíticas rígidas y quebradizas por el proceso de diagénesis.

Durante la diagénesis, pueden aparecer algunos minerales arcillosos nuevos a través de la transformación de minerales arcillosos preexistentes y la neoformación de algunos minerales silicatos no arcillosos. A alta presión y temperatura, las rocas pelíticas se metamorfosean para formar rocas metapelíticas. Además, se sabe que los minerales de arcilla no son estables en las condiciones de alta presión y temperatura, por lo que se transforman gradualmente en otros minerales. Si se aumentara mucho la temperatura, las rocas se derretirían produciendo magma, que al enfriarse y cristalizarse produce las rocas ígneas, que con el tiempo y el clima se desgastan para formar arcilla nuevamente.

Estos minerales arcillosos formados se encuentran hidratados por lo que tienen un volumen mayor que los minerales originales, además de una menor densidad que la roca inicial (Mukherjee, 2013; Velde, 1995). Se puede observar cómo se desarrollan estos procesos en la Figura 8, en la que, después de describir el proceso de formación de las arcillas, se percibe que forman parte de un ciclo interminable, en donde se parte de una arcilla y podemos formar otra arcilla, que, a su vez, puede formar otra arcilla (Domínguez & Schifter, 1995; Mukherjee, 2013).



Figura 8. Proceso de formación, transformación y destrucción de una arcilla natural.

El proceso de formación lleva a una primera clasificación de las arcillas que permite distinguir su procedencia:

- Primarias: son aquellas que permanecen en el sitio físico donde se descompuso la roca madre.
- Secundarias: son aquellas que han sido transportadas lejos de la roca madre por el viento, el agua u otros eventos naturales.

Así, las arcillas pueden ser originarias de un solo lugar o, simplemente son nómadas, es decir, viajaron de otro lugar y se mezclaron con las arcillas nativas formando nuevas arcillas.



Figura 10. Yacimiento de arcillas formadas a partir de rocas y agua.

La gran mayoría de las arcillas contienen grupos funcionales hidroxilo (OH^-), que forman una parte importante de su estructura. Por otro lado, iones como el H^+ , el K^+ , entre otros, forman parte de las rocas y, por tanto, durante el proceso de formación de las arcillas, ocurre que el H^+ sale rápidamente de la estructura de las rocas por un efecto hidrotérmico, es decir, por acción de la temperatura (hablamos de temperaturas bajas), comparado con el potasio que sale un poco más lento (requiere más altas temperaturas), por lo que el H^+ se une a los grupos hidroxilo para formar agua en forma de vapor y se libera a la atmósfera, mientras que el potasio se incorpora a otros minerales que están presentes durante el proceso de sedimentación, además de que en presencia de grupos hidroxilo, forman un nuevo mineral. Siendo así, a grandes rasgos, la reacción de formación de las arcillas naturales, es decir, a la reacción inicial se le agrega temperatura y se forman arcillas, además de otros procesos y condiciones.



Ahora se puede comprender que los minerales arcillosos son el componente principal de muchos sedimentos y rocas de grano fino, es decir, el barro, lutitas, arcillas, limolitas arcillosas, exudaciones arcillosas y argilitas, entre otras, formando una parte vital de los suelos, lagos, estuarios, deltas y los sedimentos oceánicos que cubren aproximadamente 75% de la superficie de la Tierra, claro, sin contar el agua. Por lo que se pueden clasificar a las rocas que constituyen la corteza terrestre como:

- Ígneas, endógenas, magmáticas o eruptivas: son las que se forman por enfriamiento y solidificación del magma. Se pueden dividir en plutónicas, hipabisales y volcánicas.
- Sedimentarias o exógenas: se originan en el exterior de la corteza terrestre por alteraciones meteóricas, químicas o biológicas de las rocas preexistentes. Se clasifican como clásticas o detríticas, de origen químico y origen orgánico.
- Metamórficas: pueden ser rocas ígneas o sedimentarias cuya textura, estructura, composición y densidad se alteran al someterse a procesos naturales de presión y temperatura. Existen tres tipos de metamorfismo: de contacto, dislocación y regional.

Un claro ejemplo de los sedimentos que se encuentran en el suelo se puede observar en la arena de las playas; la arena gruesa está constituida por partículas de rocas que formaron parte de los minerales originales, mientras que, en la arena fina, los constituyentes están más separados y son más susceptibles a un cambio de ubicación y a un ataque químico, por lo que se observa que presentan, además de diferente tamaño de partícula, diferente color. Otra forma de ver este proceso, es que durante la formación de los suelos, se propició la mezcla de diversos materiales que se diferencian del material original en cuanto a su comportamiento, constitución y propiedades, como se observa en la Figura 11, donde se encuentra una clara diferenciación para los materiales contenidos en la fase inorgánica del suelo, mencionada anteriormente (Bensoain, 1985).

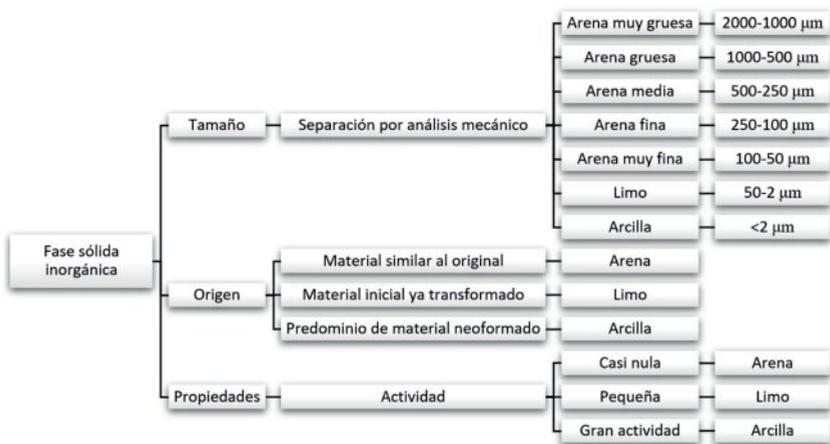


Figura 11. Distintos materiales que conforman la fase sólida inorgánica del suelo.

Siempre hay una referencia a la arena, pero eso no es todo, siempre existen otros materiales que se presentan en el suelo, los cuales, se pueden clasificar como (Millot, 1972):

1. Residuos insolubles: los cuales pueden ser arenas o areniscas que contienen minerales muy resistentes como el cuarzo y el zircón, además de la turmalina, monacita, granates, ilmenitas, el oro y por supuesto, el diamante.
2. Residuos hidrolizados: en los que se encuentran las bauxitas, arcillas y sales, que contienen óxidos hidratados e hidróxidos de aluminio, además de elementos como galio, titanio, magnesio, níquel, escandio, estaño, tantalio, antimonio, potasio, rubidio, cesio y elementos de tierras raras.
3. Oxidantes: incluyen un gran número de menas sedimentarias de hierro y manganeso en forma de óxidos e hidróxidos, además, elementos como fósforo, vanadio, plomo, zinc, antimonio, arsénico, germanio, selenio, molibdeno y tungsteno.
4. Sedimentos de reducción: como el carbón, sedimentos bituminosos y de sulfuro, además de azufre, arsénico, vanadio, cobre, zinc, indio y plata.
5. Sedimentos de carbonato: donde se tienen a las calizas y dolomitas.
6. Sedimentos evaporita: que involucran a las sales como cloruros, sulfatos, boratos de metales alcalinos y alcalinotérreos, así como carbonatos, nitratos y elementos como el flúor, cloro, bromo y yodo.

¿Dónde están las arcillas?

Se pueden encontrar arcillas por todas partes, desde el suelo que pisamos, hasta las paredes de los hogares. En todo el planeta Tierra encontraremos arcillas (Figura 12), incluso debajo de los mares.

En México, las arcillas están distribuidas a lo largo y ancho del país, de las cuales, en la actualidad, la bentonita y el caolín son las arcillas que más se explotan comercialmente de acuerdo con la Secretaria de Economía en 2015.



Figura 12. Mapa de la Tierra representando la dispersión de arcillas en suelo seco (color marrón) y en suelo mojado (gris).

Los mayores yacimientos de caolín se encuentran en los estados de Guanajuato, Hidalgo y Veracruz, mientras que la bentonita aflora más en Durango, San Luis Potosí y Puebla (Figura 13).



Figura 13. Mapa de México indicando donde se encuentran los mayores yacimientos de arcillas de tipo bentonita (cuadro amarillo) y caolín (triángulo anaranjado).

Conociendo las peculiaridades de las arcillas

Se ha observado que las arcillas son una parte importante de nuestra vida y que se encuentran en todo nuestro mundo, pero ¿cómo se puede decidir qué aplicación se les puede dar? Para responder a esto, es necesario conocer sus características.

Hasta ahora se ha hablado de una característica que presentan las arcillas: la plasticidad. Se ha visto que la humanidad ha empleado estos materiales para solventar algunas necesidades que se presentan en la vida cotidiana, por lo que era necesario moldear el material para obtener diversos objetos, por ello la plasticidad jugó un papel importante para que se adquiriera la importancia que se tiene hasta ahora.

La plasticidad permite que al manipular las partículas se queden en su sitio, es decir, la arcilla permite ser estirada, flexionada y presionada para adoptar diversas formas, claro, con la adición de agua, ya que, sin ésta, solo se estaría moldeando polvo. Esta característica de la plasticidad va en estrecha relación con la porosidad, la cual, sin entrar a detalles más específicos, se puede conocer con una simple técnica como la adsorción de agua, es decir, se les puede sumergir o añadir agua a la arcilla y se va midiendo la cantidad de agua que se le agrega. Con esto se observa que no todas las arcillas tienen la misma capacidad de adsorber agua; algunas adsorberán más que otras. Además, con el moldeo también se debe considerar la textura, ya que las arcillas pueden presentar diversas sensibilidades al tacto o la vista.

A partir de estas características, que se basan en una combinación de agua y arcilla, se puede determinar otra, realizando el proceso contrario, es decir, retirando toda el agua o la mayor parte, mediante un proceso de secado al ambiente o con ayuda de un horno. Durante este proceso la arcilla presenta la característica de contracción. Esto sucede porque las partículas de arcilla van perdiendo el agua que han adsorbido por efecto de la temperatura.

Por otro lado, se ha mencionado un término muy importante desde la definición de las arcillas, el tamaño de partícula. Los materiales arcillosos han mostrado un amplio panorama de lo multifuncionales que pueden llegar a ser. Además, se ha comprobado que las propiedades fisicoquímicas y mejor aún, las propiedades biológicas de las arcillas dependen en gran medida del tamaño de la partícula. En otras palabras, a menor tamaño de partícula (diámetro), mayor será el área superficial específica, comparada con el volumen de la partícula y, por tanto, más

intensas serán sus propiedades para un uso en específico. En efecto, las propiedades de las arcillas son dominadas por su superficie. Lo que lleva a otra propiedad importante, la forma de las partículas (Bensoain, 1985).

Las arcillas tienen una particularidad muy importante, su estructura se forma por el apilamiento de hojas (láminas), de ahí es donde proviene uno de los nombres que se les ha dado: filosilicatos. Esta forma les permite tener una mayor área superficial comparada con otros minerales que presentan el mismo tamaño de partícula, pero que tienen forma de cubos o esferas. Dependiendo de la forma de sus partículas, podemos agruparlas en tres grandes grupos (Velde, 1995) (Figura 14):

- Hojuelas: hojas de iguales dimensiones en dos direcciones.
- Listones: son hojas de aspecto lineal en donde una dirección es más grande que otra.
- Agujas: presentan una estructura estrecha, larga y puntiaguda.

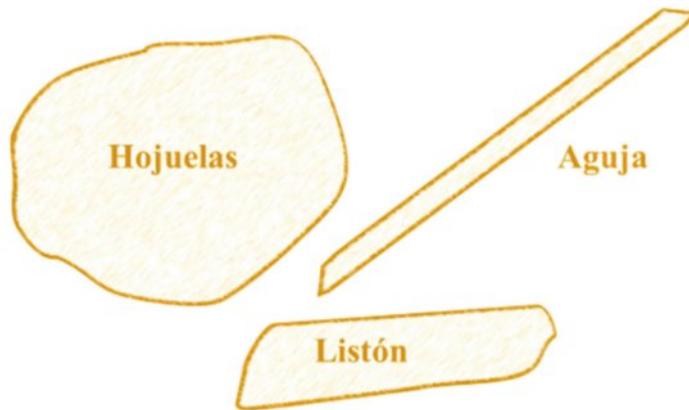


Figura 14. Formas de las partículas de arcillas.

Un aspecto relevante para adoptar esa forma de las partículas es la composición que presentan. Las arcillas tienen agua en su interior, se sabe porque se formaron a partir de su combinación con las rocas, pero ¿cómo podemos comprobarlo? Una manera simple de hacerlo es retomar el proceso que se mencionó anteriormente, que consiste en mezclar una arcilla con agua. Este proceso lo hemos visto

con los alfareros, que mezclan arcillas con agua y las moldean en un torno. Así, en este proceso, el agua se deposita entre las hojas de las arcillas y hace que sus láminas se expandan y cuando el alfarero lo seca, el agua al interior se evapora y hace que la arcilla se compacte, permitiendo mantener la figura moldeada, es decir, las arcillas se pueden expandir y contraer con el agua. En efecto, las arcillas atraen el agua permitiendo crear reservas de agua en el ambiente.

El proceso de atracción del agua en las arcillas es muy simple y ocurre por dos procesos: adsorción de agua en su superficie y absorción de agua en el interior de su estructura. Así, si se considera el área superficial de las partículas de arcillas y se compara con su volumen de adsorción, se puede conocer la forma de las partículas que presentan mayor adsorción de agua siguiendo la siguiente tendencia: hojuela > listón > aguja; por tanto, gracias a esta característica, más evidentes serán las propiedades superficiales de las arcillas en una mezcla acuosa.

Para que el proceso de adsorción de agua ocurra en las arcillas naturales, las partículas deben estar dispuestas en diferentes aglomerados con diferentes conformaciones, por ello, se pueden tener diferentes formas para representar este aspecto, como se muestra en la Figura 15.

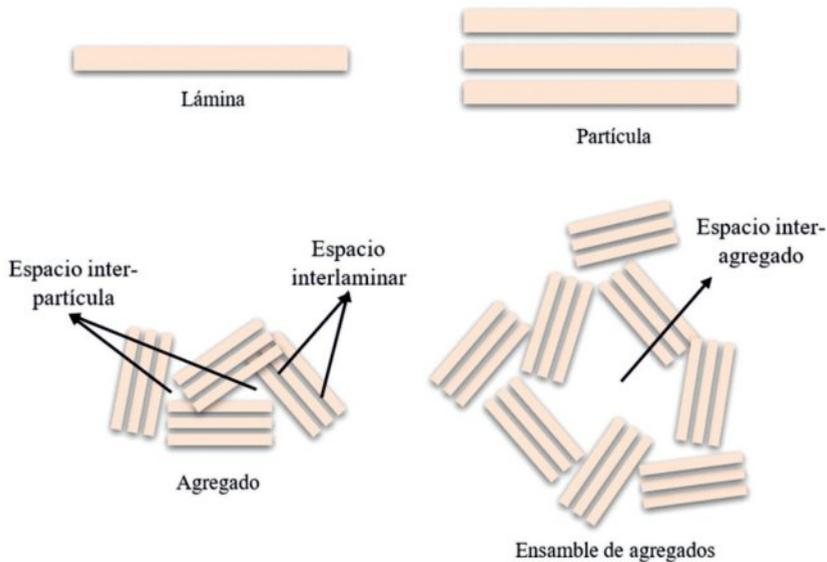


Figura 15. Tipo de acomodo de las partículas de arcillas.

Otra característica importante y que es muy sencilla de observar, es su color. El color da una idea de los elementos que puede contener una arcilla, por ejemplo: cuando el hierro (Fe) se encuentra presente, la arcilla adopta un color entre rojizo y café amarillento; el manganeso (Mn) puede conferirles un tono negro. Además, la materia orgánica, que puede estar combinada con ellas, podría generar coloraciones negras.

Así, estas características generan más interrogantes que nos orientan a desmembrar cada particularidad de las arcillas.

Naturaleza arcillosa

Por muchos años, los científicos se han enfocado en identificar los constituyentes de las arcillas, es decir, conocer los elementos que las forman. De manera general se sabe que las arcillas, cuando se forman en condiciones naturales favorables, su estructura interna se verá reflejada en su morfología (forma) externa, mostrando una estructura cristalina. Por otro lado, en condiciones especiales o no favorables, resultan en sólidos criptocristalinos, en los cuales, a simple vista, no es posible identificar la estructura cristalina, por lo que es necesario emplear algunas técnicas de caracterización para poder identificarla como por ejemplo la difracción de rayos X. Otras formas de sólidos que se pueden encontrar en la naturaleza son los sólidos amorfos, como los vidrios volcánicos, mismos que no califican con el término de arcillas, o como minerales.

Se sabe que las arcillas están compuestas de diversos elementos, lo que les confiere diversos colores. De manera general, son aluminosilicatos hidratados que pueden ser cristalinos o raramente amorfos. Están formados básicamente por silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) y agua (H₂O). Por otro lado, de manera más general se conoce que la corteza terrestre está compuesta por una gran cantidad de minerales que se clasifican en ocho grupos (Mukherjee, 2013):

1. Elementos nativos.
2. Sulfuros.
3. Óxidos e hidróxidos.
4. Haluros.
5. Carbonatos, nitratos y boratos.
6. Sulfatos, cromatos y molibdatos.

7. Fosfatos, arseniatos y vanadatos.
8. Silicatos.

Por tanto, al conocer la gran variedad de minerales en la corteza terrestre, las arcillas pueden llegar a estar constituidas comúnmente por elementos adicionales a los mencionados anteriormente, es decir, además del silicio, aluminio y oxígeno, se encuentran elementos como:

- Metales alcalinos: sodio (Na) y potasio (K).
- Metales alcalinotérreos: calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- Metales de transición: cromo (Cr), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn).
- No Metales: carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S).
- Halógenos: flúor (F) y cloro (Cl).

Esta cantidad de elementos da una idea de que las arcillas pueden estar mezcladas con otros materiales, como los óxidos, los cuales suelen disponerse como películas concéntricas alrededor del núcleo de una arcilla, llegando a modificar un poco sus propiedades. Por tanto, es necesario conocer como están dispuestos los elementos en la estructura arcillosa.

El esqueleto de una arcilla

Hace más de un siglo se descubrió el uso de los rayos X para observar el interior del cuerpo humano, pero ahí no se detuvo su uso, sino que además permitió conocer el interior de las arcillas.

Anteriormente, se ha dado el nombre de filosilicatos, los cuales, como su nombre lo dice, contienen hojas de silicato (del griego *phyllon* que se traduce como hoja), pero ¿cómo es posible que el silicato esté en forma de hojas? Para responder a esta interrogante se considerará el silicio, el cual, en combinación con el oxígeno genera una estructura tetraédrica, es decir, el silicio se coordina con cuatro átomos de oxígeno, y se vincula con otros tetraedros de silicio compartiendo tres esquinas para formar un patrón hexagonal bidimensional infinito para formar capas de silicato como se observa en la Figura 16.

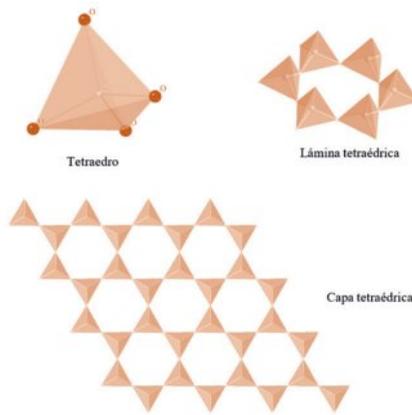
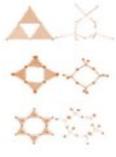
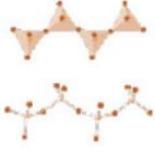
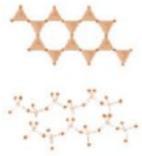
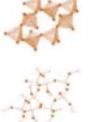


Figura 16. Representación de una capa con arreglo hexagonal de tetraedros $[\text{SiO}_4]^{4-}$.

A partir de esta información se observa que a medida que se aumenta el grado de polimerización del silicato, se van formando unidades cada vez más complejas que se agrupan de acuerdo a la estructura que generan y así, obtener una clasificación en cuanto a los silicatos (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los silicatos.

Silicato	Grupo estructural	Representación de la estructura	Relación O:Si	Fórmula	Ejemplo
Neso-Silicato	Independiente		4:1	$(\text{SiO}_4)^{4-}$	Olivino, granates, circón, topacio, distena, andalucita y silimanita
Soro-Silicato	Dobles		7:2	$(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$	Oakermanita Epidota Torveitita

Ciclo-Silicato	Anillos		3:1	$(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$	Benitoita
				$(\text{Si}_4\text{O}_{12})^{8-}$	Noonkanbahita Bavsiita
				$(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$	Berilo Turmalinas
Ino-Silicato	Cadenas simple		3:1	$(\text{Si}_2\text{O}_6)^+$	Piroxenos como enstatita, hiperstena, diópsido y augita
	Cadenas dobles		11:4	$(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$	Anfiboles como antofilita, tremolita y hornblenda.
Filo-Silicato	Hojas		5:2	$(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$	Caolinita Pirofilita Talco Cloritas
Tecto-Silicato	Redes tridimensionales		2:1	SiO_2	Cuarzo

La unión hace la fuerza

Las arcillas no solo tienen hojas de silicatos en su estructura, sino que, además, tienen hojas octaédricas de otros elementos, en las cuales, cada octaedro se vincula a otro octaedro por la unión de sus bordes, formando hojas de simetría hexagonal o pseudo-hexagonal que presentan grupos hidroxilo (OH^-) en sus esquinas vacías, los cuales pueden estar en posición *cis* o *trans*.

Los elementos más comunes que se encuentran formando capas tetraédricas en las arcillas, en su forma iónica, son Si^{4+} , Al^{3+} y Fe^{3+} , mientras que los elementos que forman capas octaédricas, en su forma iónica, son Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , V^{3+} , Cr^{3+} y Ti^{4+} . Ambas capas se enlazan de una ma-

nera especial: las esquinas libres de todos los tetraedros apuntan al mismo lado de la hoja y es gracias a estas esquinas que se unen a los octaedros para formar un plano común (al que se llamará hoja o lámina) formando los dos tipos de estructuras más comunes: 1:1 (o TO) y 2:1 (o TOT), o una estructura menos común 2:1+1 (o TOT+O). La estructura 1:1 consiste en la repetición de una hoja tetraédrica y una octaédrica, mientras que en la estructura 2:1 se intercala una hoja octaédrica entre dos hojas tetraédricas y las de tipo 2:1+1 están compuestas por la unión de una lámina de estructura 2:1 con una capa octaédrica adicional Figura 17.

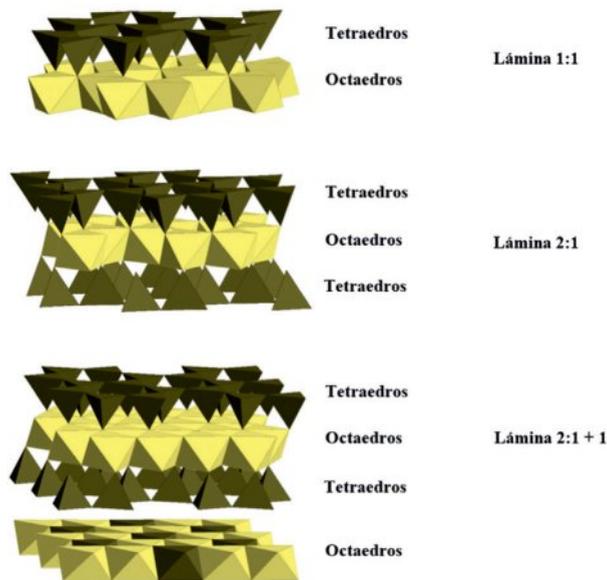


Figura 17. Tipos de estructuras de las arcillas.

En estas estructuras, los oxígenos del extremo de los tetraedros se convierten en los vértices de los octaedros. Así, los seis vértices de los octaedros en una estructura 1:1 se forman por 4 radicales OH^- y 2 oxígenos en los extremos de los tetraedros.

En las estructuras 2:1, solo se encuentran dos radicales OH^- , debido a que los otros cuatro vértices son oxígenos de las dos hojas tetraédricas, es decir, los oxígenos se comparten entre la capa octaédrica y tetraédrica.

Cuando las estructuras se forman, generan un espesor determinado y constante que podemos llamar como el espesor de la estructura fundamental de la

hoja. Cuando tenemos hojas tetraédricas consideramos un espesor de 3.4 Å, mientras que las hojas octaédricas son más pequeñas con 3.2 Å.

Como se ha mencionado, una capa está interconectada con otra a través de un átomo de oxígeno compartido; por tanto, al existir una mayor atracción, el espesor combinado de las dos capas será menor que la suma de las dos capas individuales. Estos datos se pueden observar en la Tabla 2, donde se reporta la variación en el espesor de las láminas de los tipos de estructura que conforman las arcillas (Velde, 1995).

Tabla 2. Espesor de las láminas de arcillas según sus estructuras.

Lámina	Estructura	Espesor de la lámina
1 Tetraédrica + 1 Octaédrica	1:1	7 Å
2 Tetraédricas + 1 Octaédrica	2:1	10 Å
2 Tetraédricas + 2 Octaédricas	2:1 + 1	14 Å

Asimismo, se puede representar las estructuras como la unión de bloques en la que se observa de manera más simple la estructura de las arcillas (Figura 18).

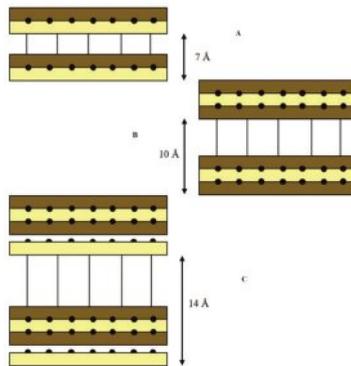


Figura 18. Representación de las diferentes estructuras de las arcillas. A) tipo 1:1; b) tipo 2:1 y c) tipo 2:1+1.

Además, las láminas de 7 o 10 Å se pueden apilar una sobre otra de diferentes maneras, lo que genera diferentes estructuras cristalográficas a distancias mayores que una sola lámina, a lo que se conoce como polimorfismo. A grandes rasgos, se puede definir el polimorfismo cuando las láminas tienen la misma estructura

y composición, pero dan una morfología interna diferente, lo que permite distinguir entre los diferentes orígenes de una misma fase mineral.

A través de su esqueleto

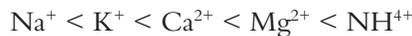
Un evento muy importante ocurre cuando las capas octaédricas y tetraédricas se combinan, lo cual, puede generar que la estructura adquiera una carga neutra o que la estructura quede negativamente cargada. Para el primer caso, la neutralidad debe presentar alguno de los siguientes aspectos (Bergaya *et al.*, 2006):

1. La capa octaédrica contiene cationes trivalentes, denotados como R^{3+} , en dos sitios octaédricos seguidos con un tercero vacío.
2. Cationes divalentes R^{2+} ocupen todos los sitios del octaedro.
3. Las láminas del tetraedro contengan exclusivamente Si^{4+} .

Mientras que, para que la estructura quede negativamente cargada deben presentarse algunos de los siguientes aspectos:

1. La sustitución de un Al^{3+} por un Si^{4+} en los sitios tetraédricos.
2. Cuando se sustituye un Al^{3+} o un Mg^{2+} por un catión de más bajo estado de oxidación en los sitios octaédricos.
3. Existencia de sitios disponibles en la estructura para ser ocupados por un catión.

Por tanto, esta variación en la carga de la estructura de las arcillas genera que la estructura de tipo 2:1 sea una de las más llamativas para su empleo en diversos campos de aplicación, debido a que permite que algunos sitios sean ocupados o remplazados por cationes, los cuales se pueden intercambiar. Comúnmente, el orden de afinidad para el intercambio está determinado por el tamaño y carga del catión. Así, cuanto menor y más cargado sea, mejor afinidad presentará, como se muestra para algunos cationes (Selley *et al.*, 2005):



Así, el amonio (NH_4^+) suele estar más fuertemente fijado en los sitios interlaminares que el Na^+ , de acuerdo con el orden de afinidad reportado.

En la naturaleza no es común que se presenten arcillas puras, de manera que generalmente uno o más iones de la estructura son sustituidos por otros iones;

este proceso es conocido como sustitución isomórfica. Para que ocurra este intercambio, un ion puede ser remplazado por otro solo si sus radios iónicos difieren de menos de 15%.

De esta manera, se pueden citar algunos remplazos que son frecuentes en la naturaleza, como el Mg^{2+} por Ca^{2+} , Fe^{3+} por Al^{3+} o Fe^{2+} por Mg^{2+} , con lo cual, no se modificaría el balance eléctrico, pero, si un Al^{3+} sustituye un Si^{4+} , esta carga sobrante debe compensarse, por lo que provocaría la introducción de cationes adicionales, este fenómeno ocurre principalmente en los tetraedros. Sin embargo, cuando se trata de octaedros, un Al^{3+} puede ser remplazado por Fe^{2+} o Mg^{2+} u otros cationes de tamaño similar.

Así, los tipos de arcillas pueden ser discriminados en cuanto a la composición química y estructura, reuniéndolas en familias.

¿Quién es quién en las arcillas?

Mucho tiempo ha pasado desde que la humanidad comenzó a darle un uso práctico a las arcillas. Las civilizaciones antiguas ya comenzaban a identificar las diferentes características y propiedades de los suelos. Los mexicas clasificaban a sus tierras a través de diversos atributos como: textura, agregados, color, contenido orgánico, topografía, génesis, tipos de plantas que se podían sembrar, fertilidad y prácticas agrícolas para las que se empleaban (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2017).

El Códice de Santa María Asunción reúne toda esta información que fue compartida entre los europeos y nuestros antepasados. Esta clasificación comprendía a las tierras formadas por el acarreo de partículas por acción del agua, llamadas “atoctli”; la tierra negra de barro cuyo nombre era “tezoquitl”; una tierra amarilla llamada “tlalcoztli”; las tierras recuperadas o tepetates con nombre “tepetlatlalli”; la tierra arenosa “xalalli”; las tierras en las que se ubican en las laderas se les conocía como “tlaixtli” y las tierras pedregosas llamadas “tetlalli” (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2017).

Por otra parte, Fray Bernardino de Sahagún, en su compendio de libros llamado *Historia general de las cosas de la Nueva España*, menciona los tipos de usos y procedencia de los diferentes tipos de suelos empleados por los mexicas, como se puede leer en el extracto mostrado a continuación:

“Hay una tierra pegajosa, buena para hacer barro de paredes y suelos para los tlapancos. Y también es fértil. Hácese bien el maíz y el trigo.

Hay otra manera de tierra fértil que se llama callalli; quiere decir «tierra donde ha estado edificada alguna casa». Y después que se cava y siembra es fértil”.

Por tanto, desde los antiguos habitantes mexicanos se ha tratado de clasificar a los materiales que tenemos a nuestro alrededor. Para poder clasificar a las arcillas, se debe recordar que son mayoritariamente silicatos y provienen de la polimerización del grupo tetraédrico $(\text{SiO}_4)^{-4}$ que, según la disposición de este grupo en las estructuras, se pueden identificar 6 grupos (Figura 19). Además, se agregan a éstos el grupo de las hidrotalcitas, las cuales no están basadas en silicatos.

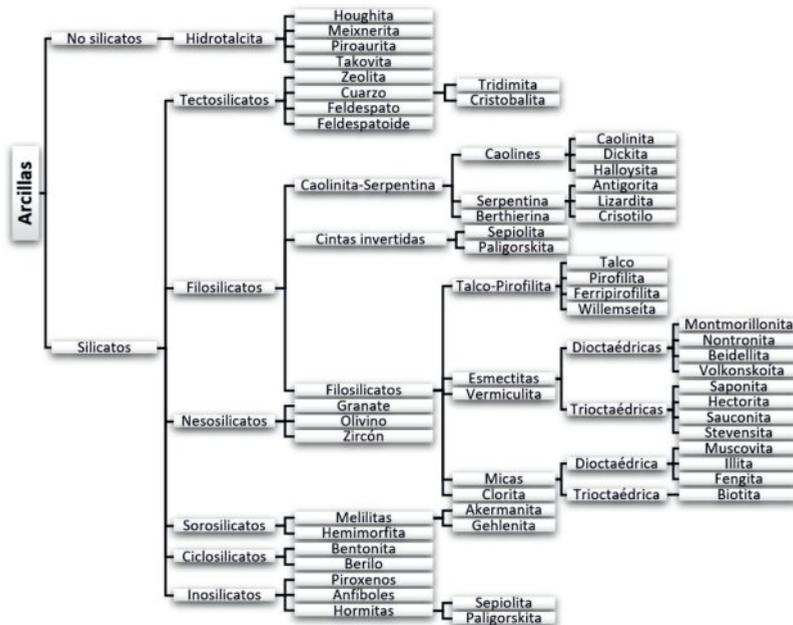


Figura 19. Clasificación de las arcillas según la forma de las unidades de silicatos en las estructuras.

Se pueden agrupar a las arcillas con base a sus características estructurales y químicas en familias que permiten describirlas adecuadamente (Velde, 1995):

- Difórmicos o de estructura 1:1: es la estructura más sencilla que podemos encontrar en las arcillas. Dentro de este grupo se pueden encontrar arcillas como:
 - Caolines: en esta familia se tiene a la caolinita que presenta dos átomos, en su formar iónica Al^{3+} y baja cantidad de átomos en forma iónica de Fe^{3+}

formando capas octaédricas. Una variación de esta arcilla es la dickita que se forma a altas temperaturas siendo un politipo de la caolinita. El caolín fue descubierto en China en la montaña Kao-Ling, de la que deriva el nombre de esta familia. Comúnmente recibió el nombre de oro blanco debido a su increíble blancura y belleza, además, recibió tal atención que se construyeron incluso pagodas de este material. Otra variante de la caolinita es la halloysita, que es idéntica a la caolinita, con la diferencia de que presenta más agua en su estructura, lo que distorsiona la estructura laminar y le confiere una forma tubular. La halloysita recibió su nombre en 1826 en honor de su descubridor Jean-Baptiste Julien d'Omalius d'Halloy.

- Otro tipo de arcillas son las Berthierinas con un alto contenido de Fe^{2+} y las serpentinas con un alto contenido de Mg^{2+} . Ambos minerales presentan entre 2.5 y 3 átomos, en forma iónica, en su mayoría divalentes. Las serpentinas fueron descubiertas en 1564 por Georg Bauer, nombrándolas en alusión al color verde moteado que asemeja a una serpiente; además, se han encontrado poliformas de este material como antigorita, lizardita, crisotilo y en combinación con otros metales que generan minerales como amosita y garnierita. Las berthierinas fueron nombradas en honor a Pierre Berthier y presentan un color verde olivo oscuro.
- Trifórmicos o de estructura 2:1: en este tipo de estructuras se pueden encontrar tres tipos de arcillas:
 - Neutrales: en este grupo se encuentran:
 - Pirofilita, que fue descubierta en el yacimiento de oro de Berezovskoye en Rusia y está compuesta por una capa octaédrica de Al^{3+} y otra tetraédrica de Si^{4+} , análoga a ésta, se encuentra a la ferripirofilita que está constituida por hierro y silicio.
 - Talco, que presenta casi tres iones divalentes en sus sitios octaédricos con un pequeño número de iones trivalentes en los sitios octaédricos y tetraédricos, y constituido en su mayoría por Mg^{2+} , además del Si^{4+} ; fue nombrado haciendo alusión a su color blanco en el año de 1546 por Georg Bauer. Análogamente al talco se encuentra a la minnesotaita que consta, en lugar de Mg^{2+} , Fe^{3+} .
 - Willemseita, que se compone por níquel y silicio y adquiere su nombre por su descubridor, Johannes Willemse en 1968 en una mina de Barberton, Sudáfrica.

- Baja carga estructural: En este grupo se pueden encontrar arcillas como:
 - Montmorillonita: presenta una estructura dioctaédrica compuesta por dos capas tetraédricas de Si^{4+} y una capa octaédrica de aluminio con sustituciones de Fe^{3+} y Mg^{2+} que generan un desbalanceo de cargas. Fue descubierta en Montmorillon, Francia.
 - Beidellita: de estructura dioctaédrica con dos capas octaédricas dominadas por el silicio y una capa octaédrica exclusivamente de aluminio. Recibe su nombre por el lugar donde se descubrió: Beidell, Colorado, Estados Unidos,
 - Nontronita: de estructura dioctaédrica formada por una capa tetraédrica de hierro con algunas sustituciones de Si^{4+} y dos capas octaédricas de Al^{3+} y en ocasiones con una baja cantidad de Mg^{2+} . Fue descubierta en 1827 en Nontron, Francia.
 - Volkonskoíta: estructura dioctaédrica con dos capas tetraédricas de Al^{3+} y Si^{4+} y una capa octaédrica que contiene cationes de Ca, Cr, Mg y/o Fe. Fue descubierta en 1831 y recibe su nombre en honor a Petr M. Volkonskoi.
 - Vermiculita: de estructura trioctaédrica compuesta por capas tetraédricas de cationes de Si y Al y una capa octaédrica con cationes de Mg, Fe y/o Al. Su nombre proviene del latín “vermicular” en alusión a su peculiar exfoliación en agregados parecidos a gusanos.
 - Saponita: su capa octaédrica presenta iones divalentes y sitios disponibles que hacen necesaria iones de compensación en los sitios entre capas. Descubierta en 1840 en la península de The Lizard en Cornualles. Su nombre proviene del latín *sapo - onis*, que traducido al castellano significa jabón, e “ita” en alusión a su tacto y apariencia grasosa o jabonosa.
 - Stevencita: Este material se caracteriza por una baja ocupación de los sitios octaédricos, lo que le confieren una descompensación de cargas.
- Alta carga estructural: En este grupo se pueden encontrar arcillas como:
 - Illita: presenta sustituciones de Fe y Mg en su capa octaédrica y algo de Al en sus capas tetraédricas. Fue descubierta en 1937 en Illinois, Estados Unidos.
 - Galuconita-celandonita: este grupo presenta alto contenido de Fe y poca cantidad de Al en una estructura dioctaédrica. El nombre de gauconita proviene del griego “glaukos” que significa azul-verde en alusión a su color. La celandonita fue también nombrada por su color del francés “céladon” que significa verde agua.

- Tetrafórmicos o de estructura 2:1 + 1: Este grupo se compone estrictamente por estructuras trioctaédricas formadas a baja temperatura en el ambiente. Un ejemplo de ello son las cloritas, que resultan de sustituciones complejas y simultáneas, presentando varios tipos de sustitución iónica al mismo tiempo.
- Mezclados: son minerales di, tri y tetrafórmicos interestratificados como la rectorita que fue nombrada en honor al coronel Elias William Rector, por haber apoyado a la formación de la Academia Geológica de Arkansas.

De esta clasificación se pueden reunir a las arcillas en grupos y subgrupos descritos resumidamente en la Tabla 3 o más detalladamente en la Tabla 4.

Tabla 3. Clasificación de las arcillas en grupos y subgrupos según el tipo de capa.

Tipo de Capa	Grupo (X = Carga)	Subgrupo	Minerales
1:1	Caolín/Serpentina X = 0	Caolines Serpentinas Berthierinas	Caolinita, dickita, nacrita, crisotilo, antigorita, lizardita, amosita, garnierita
2:1	Talco / Pirofilita X = 0	Talcos Pirofilitas	Talco Pirofilita Willemsita
	Esméctica X = 0.2 - 0.6	Montmorillonitas Saponitas	Montmorillonita Saponita Beidellita Nontronita
	Vermiculita X = 0.6 - 0.9	Vermiculitas dioctaédricas y trioctaédricas	Vermiculita
	Mica X = 1 - 2	Micas y micas frágiles dioctaédricas y trioctaédricas	Biotita, moscovita, clintonita, margarita, illita galuconita, celandonita
	Sepiolita/Palygorskita X = 0	Sepiolitas Palygorskitas	Sepiolita, loughlinita, palygorskita
2:1:1	Clorita X = variable	Cloritas dioctaédricas y trioctaédricas	Clinocloro, chamosita, sudoita, nimita

Tabla 4. Clasificación de las arcillas en grupos y subgrupos según sus características estructurales y químicas.

Clase general	Composición de las capas	Población de capa octaédrica	Nombre del grupo	Minerales	Fórmula
Tipo de red de capas	Difórmicos (1:1)	Dioctaédricas	Kanditas	Nacrita	$Al_2Si_3O_3(OH)_4$
				Dickita	$Al_2Si_3O_3(OH)_4$
				Caolinita-Tc	$Al_2Si_3O_3(OH)_4$
				Caolinita- Ψ M	$Al_2Si_3O_3(OH)_4$
				Metahalloysita	$Al_2Si_3O_3(OH)_4$
				Halloysita	$Al_2Si_3O_3(OH)_4 \cdot 2H_2O$
		Anauxita	$Al_2Si_3O_7(OH)_4 \cdot H_2O$		
		Trioctaédricas	Septecloritas	Antigorita	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$
				Crisotilo	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$
				Amesita	$(Mg,Fe)Al_4Si_2O_{10}(OH)_8$
	Cronstedita			$Fe_4(Si_2Fe)_2O_{10}(OH)_8$	
	Berthierina	$(Fe,Mg,Al)_6(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$			
	Tetrafórmicos (2:2)	Di, trioctaédricas o mixtas	Cloritas	Clorita	Variable
		Dioctaédricas	Micas	Illita	$KAl_2(SiAl)_4O_{10}(OH)_2$
				Glauconita	$K(Al,Fe)_2(SiAl)_4O_{10}(OH)_2$
			Esmectitas	Montmorillonita	$0.33M+(AlSi_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$
			Baidellita	$0.33M+Al_2(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$	
			Nontronita	$0.33M+Fe_2(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$	
			Volkonskita	$0.33M+(Fe,Cr,Al)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$	
		Vermiculitas	Vermiculita dioctaédrica	$0.67M+(Al,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$	
Trioctaédricas		Micas	Ledikita	$KMg_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2$	
			Esmectitas	Saponita	$0.33M+Mg_3(Si_{3,67}Al_4O_{10}(OH)_2$
	Sauconita	$0.33M+(Mg,Zn)_3(Si_{3,67}Al_4O_{10}(OH)_2$			
	Hectorita	$0.33M+(Mg,Li)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$			
Vermiculitas	Vermiculita	$0.67M+(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$			
Di, tri, tetrafórmicos o mezclados	Minerales interestratificados	Minerales interestratificados	Rectorita	Variable, según composición	
Tipo de red de cadenas	Trifórmicas	Trioctaédricas	Hormitas	Sepiolita	$H_4Mg_5Si_{12}O_{30}(OH)_{16} \cdot 6H_2O$
				Palygorskita	$H_4Mg_5Si_8O_{20}(OH)_6 \cdot 6H_2O$

También, se puede tomar en cuenta la clasificación de las arcillas según la estructura y forma de las partículas que presentan (Figura 20).



Figura 20. Clasificación de las arcillas s la estructura y forma de las partículas.

Esta clasificación se detalla a continuación:

- **Amorfos:** son arcillas que no presentan ningún grado de ordenamiento en la estructura. Un ejemplo de este tipo de arcillas es la imogolita (Figura 21).



Figura 21. Mineral de imogolita.

- **Cristalinas:** son arcillas que presentan un ordenamiento regular en una estructura definida.
 - **De 2 capas:** presentan una estructura laminar compuesta por unidades de una capa de tetraedros de sílice y una capa de octaedros de alúmina.
 - **Equidimensional:** su estructura presenta iguales dimensiones en su celda unitaria, como la caolinita (Figura 22), dikita y nacrita.



Figura 22. Mineral de caolinita.

- **Alargada:** presentan una celda unitaria que se expande longitudinalmente, como en la halloysita (Figura 23).



Figura 23. Mineral de halloysita.

- **De 3 capas:** son estructuras laminares compuestas por dos capas de tetraedros de sílice y una capa central dioctaédrica o trioctaédrica.
- *Celda expandida:* se distinguen porque sus láminas se pueden expandir al introducir agua o cationes. En este grupo encontramos a las esmectitas como la montmorillonita (Figura 24) y beidellita, vermiculita, nontronita, saponita, hectorita.



Figura 24. Mineral de montmorillonita.

- *Celda que no se expande:* su estructura es rígida y no permite la absorción de agua, un ejemplo de ellas son las illitas (Figura 25).



Figura 25. Mineral de illita.

- **De capas mixtas regulares:** este tipo de arcillas presentan un apilamiento ordenado de capas alternas de diferentes tipos, de las cuales el grupo de la clorita es un gran ejemplo (Figura 26).



Figura 26. Mineral de clorita.

- **De estructura de cadena:** cadenas similares a hornblenda de tetraedros de sílice unidas por grupos octaédricos de oxígenos e hidroxilos que contienen iones de Al y Mg), de los cuales podemos encontrar a la sepiolita, paligorskita (o atapulgita) (Figura 27).



Figura 27. Mineral de paligorskita.

Por otro lado, las arcillas pueden presentar diversos comportamientos, como ya se ha mencionado, uno en especial permite clasificar a las arcillas y este es el comportamiento en presencia de agua (Figura 28).

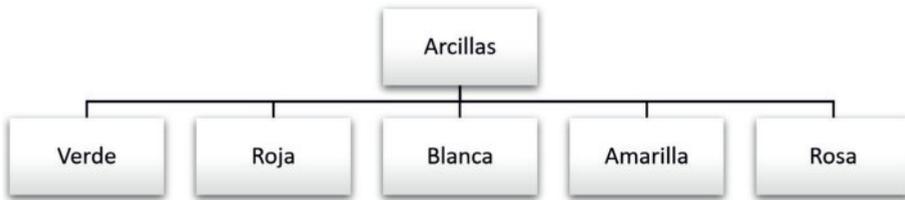


Figura 28. Clasificación de las arcillas según el comportamiento en presencia de agua.

- Arcilla Verde: es una arcilla cuyo color se debe a óxidos de hierro y magnesio, además de oligoelementos, atribuidos al medio en donde se encuentran: agua del mar, de río, etcétera.
- Arcilla Roja: se genera por granos cósmicos y polvos volcánicos cuyo color se atribuye al oligisto o hematita, a los óxidos de hierro y al cobre.
- Arcilla Blanca: comúnmente se conoce como caolinita que no contiene fósforo, ni cloro, ni zinc. Se obtiene del lavado por las aguas de lluvia y de arrastre, de ahí que su color sea muy característico.
- Arcilla Amarilla: es una arcilla que se encuentra en terrenos drenados compuesta por partículas muy finas de óxido de hierro y potasio.
- Arcilla Rosa: se obtiene por la mezcla de 2 partes de arcilla blanca y 1 de arcilla roja.

Finalmente, las arcillas han tenido un gran impacto en la sociedad, por lo que se ha intensificado su uso desde la época antigua, lo que conlleva a clasificarlas según las diferentes aplicaciones de las arcillas a gran escala (Bergaya *et al.*, 2006) (Figura 29).



Figura 29. Clasificación de las arcillas según las aplicaciones a escala industrial.

Estas arcillas se han empleado para distintos fines, pero de manera general se puede observar que genera una gran dureza cuando se cuece, como se describe a continuación:

- De alfarero: es la arcilla más común en todo el mundo y su color se lo otorga al contenido de Fe, el cual, puede variar desde tonos blancos hasta tonos muy oscuros cercanos al negro. Además, se le conoce como barro rojo cuando se cuece entre 900 y 1050 °C.
- De Gres: es la más difícil de encontrar y su coloración va cambiando desde el momento en que se extrae y procesa. Generalmente es una mezcla de diversas arcillas, pero la principal es el feldespato, posee gran plasticidad y mínima capacidad de absorción que adquiere un color gris o crema cuando se cuece a más de 1000 °C.
- De bola o *Ball clay*: presenta gran cantidad de materia orgánica lo que le confiere su tonalidad oscura entre gris, azul o negro, que se convierte en clara cuando es cocida. Su nombre lo adopta de los tiempos antiguos, en donde era transportada en forma de bolas o esferas en carretas.
- De ladrillos: es una arcilla muy impura que presenta tonos entre amarillo y rojo cuando se cuece entre 850 y 1000 °C; además presenta una gran cantidad de óxido de hierro que la hace adecuada para su uso en cerámica.
- Caolín: es una arcilla muy pura que es poco plástica, además de que presenta propiedades refractarias, siendo la arcilla que se emplea para producir la porcelana debido a que produce pastas de gran blancura.
- Refractaria: se le encuentra cerca de las vetas de carbón y presenta coloraciones muy variadas por distintos metales, caracterizándose por su elevada resistencia al fuego, es decir, es una arcilla que resiste temperaturas muy altas, cercanas a los 1500 °C, lo que les permite emplearse en la fabricación de hornos refractarios y para modelar murales.
- Bentonita: se produce a partir de las cenizas volcánicas lo que le confiere una mayor plasticidad, además de que presenta partículas muy pequeñas y presenta una gran cantidad de hierro. Es una arcilla muy plástica y se emplea en las pastas de loza o de porcelana.
- Tierra de Batán: es una arcilla de escasa plasticidad con un aspecto terroso de partículas finas que puede tener un color pardo verdoso, azulado o amarillento.
- Arcilla Pedernal (*Flint clay*): son arcillas sedimentarias muy refractarias con alto contenido de caolín y resistentes al apagado con agua (hidratación).

Propiedades de las arcillas

Cada arcilla es única en su estructura y composición; sin embargo, se pueden identificar sus propiedades para exaltar su naturalza y multifuncionalidad para diferentes aplicaciones. Anteriormente se mencionaron características como plásticidad, color, porosidad, textura, contracción, tamaño y forma de sus partículas. Todos en algún momento de la vida, han escuchado estos términos y los identificamos atribuyéndolos a eventos y materiales con los que hemos estado en contacto, pero no siempre se puede encontrar terminología tan sencilla y probablemente se necesite un glosario para poder explicar cada término que se emplea para describir a los suelos, por lo que las propiedades que caracterizan a las arcillas no se profundizarán a términos científicos complejos.

Dentro de las múltiples propiedades que presentan las arcillas podemos denotar algunas muy importantes que nos permiten conferirles una utilidad especial a cada arcilla como lo son (Mukherjee, 2013):

Propiedades mecánicas

- Capacidad de hinchamiento (adsorción de agua) y compactación (pérdida de agua): esta capacidad que presentan las arcillas para absorber agua es dependiente en gran medida de la densidad que presentan sus partículas.

Propiedades reológicas

- Esfuerzo cortante: es una resistencia que presentan las arcillas a la presión sometida, ya sea de compresión o estiramiento (tensión/deformación).

Propiedades fisicoquímicas

- Carga eléctrica: en las arcillas se pueden encontrar cargas positivas o negativas en sus láminas que le permiten combinarse e intercambiar ya sea cationes (carga positiva) o aniones (carga negativa).
- Conductividad hidráulica: es una capacidad que tienen las arcillas para transferir agua.
- Penetrabilidad gaseosa: es un fenómeno muy importante que presentan las arcillas debido a que permite contener gases en su estructura. Esta propiedad permite que gases como el aire, nitrógeno o gases orgánicos, lleguen a capas más profundas del suelo, contribuyendo así a una mejor fertilización y evitando el pudrimiento de las raíces de las plantas.

- Difusividad de iones: es una propiedad que permite a las arcillas transportar iones y moléculas dentro de su estructura. En esta propiedad, la porosidad juega un papel muy importante, debido a que los iones o moléculas se pueden alojar en su superficie y en el interior entre sus capas.
- Liberación controlada: moléculas o iones alojados en las arcillas pueden ir liberándose de la estructura de modo gradual. Con esta propiedad, las arcillas pueden contribuir a la fertilización de los suelos a través de la liberación controlada de nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas, evitando así, la contaminación de los suelos por exceso de aplicación de los fertilizantes que ocasiona la lixiviación del exceso hacia los mantos freáticos o el acarreo con la lluvia hacia los ríos, lagos o mares. También, esta propiedad resulta muy interesante en el campo farmacéutico. Mediante la liberación controlada de medicamentos por las arcillas, hace que éstos puedan ser liberados gradualmente hacia el organismo, evitando así, la ingestión en horarios determinados que, en muchos casos, son olvidados o diferidos en sus tiempos.

Las propiedades de las arcillas también pueden relacionarse entre sí; por ejemplo, la carga eléctrica y el tamaño de partícula permiten que se hidraten e interactúen, de modo que su conductividad hidráulica y sus propiedades de compresión/estiramiento las hace diferentes a otro tipo de minerales como los suelos arenosos. Algunos ejemplos de comportamientos atribuidos a sus propiedades conjugadas, los podemos ver en las esmécticas debido a que presentan sistemas de poros muy finos y tortuosos con gran área superficial específica. Cuando su densidad es muy alta, genera una resistencia considerable al flujo de agua y gases, permitiéndoles absorberlos en gran cantidad. Además de que es importante considerar las características de las arcillas, como se mencionó en apartados anteriores. En la Tabla 5 se muestran las propiedades y características de algunas arcillas.

Tabla 5. Propiedades y características de algunas arcillas.

Nombre	Color	Dureza (escala de Mohs)	Fractura y tenacidad	Brillo	Color verdadero
Clorita	Verde	2 - 2.5	No elástica, laminar	Perlado	Verde pálido a blanco
Feldespató	Incoloro, blanco, rojizo, amarillento (si es impuro)	6	Desigual, quebradizo	Vitreó con exfoliación perlada	Blanca
Caolinita	Blanco, tonos de amarillo a pardo	1.5 - 2	Requieren microscopio para su identificación	Mate, nacarado	Blanco
Micas	Blanco (moscovita), negro (violita), coloraciones impuras	2 - 3	Flexibles, elásticas	Vítreo o sedoso	Blanco
Olivina	Verde	6.5 - 7	Concoidea	Vítreo	Verde olivo
Piroxeno	Blanco, verde, negro	5 - 7	Quebradizo	Vítreo, aperlado	Blanca a gris- verde
Talco	Blanco a blanco verdoso	1	Plateado a graso	Vítreo aperlado	Blanco a blanco verdoso
Serpentina	Verdoso en varios tonos	2 - 5	A menudo fibrosa a compacta laminar	Graso compacto	Verde

Arcillas bondadosas

Se ha visto que las arcillas pueden intercambiar iones, mantenerlos con ellas, transportarlos y volver a intercambiarlos; es así como el suelo se ha llenado de diversos materiales con diferentes estructuras y composiciones. Así, esta bondadosa propiedad de las arcillas ha permitido que su participación forme el suelo como se conoce (Fetter & Velázquez-Herrera, 2020).

Esta capacidad de intercambio solo se puede encontrar entre las láminas de las arcillas, en las que se tienen tanto iones positivos como negativos (cationes y aniones) dependiendo del tipo de arcilla. Este fenómeno es el resultado de la descompensación de cargas que ocurre en las capas octaédricas y tetraédricas por efecto de la sustitución de algún elemento estructural de la arcilla. Es por ello, por lo que pueden estar presentes una gran variedad de iones de compensación en el espacio interlaminar. Generalmente, el intercambio de iones está determinado en gran medida por la química de los fluidos del suelo. En la gran mayoría de estos eventos, los iones pueden intercambiarse a medida que cambia la composición del fluido.

Existen tres tipos de iones que pueden ocupar el espacio interlaminar de las arcillas (Velde & Barré, 2017):

1. Los iones que se asocian con el grupo hidroxilo (OH^-), en los cuales se pueden encontrar arcillas con estructuras dioctaédricas o trioctaédricas como las cloritas o saponitas.
2. Iones que van acompañados de moléculas de agua, o mejor conocidos como iones hidratados.
3. Aquellos iones que son anhídros como las micas o las illitas debido a que el único ion de este tipo es el potasio.

Por tanto, los iones entre las capas (interlaminares) juegan un papel muy importante que permiten identificar la especie de arcilla que se tiene y la función que se le puede otorgar para aplicaciones muy variadas. Algunas capacidades de intercambio a pH neutro se reportan en la Tabla 6. En ella también se puede observar cómo se relaciona el área superficial específica y su capacidad de intercambio (Mukherjee, 2013).

Tabla 6. Capacidad de intercambio iónico y áreas superficiales de algunas arcillas.

Arcilla	Capacidad de intercambio iónico (miliequivalentes por 100 g)	Área superficial específica (m ² /g)
Illita	10 - 40	10 - 100
Clorita	10 - 40	10 - 55
Vermiculita	100 - 150	760
Caolinita	3 - 15	5 - 40
Halloysita	40 - 50	1 - 100
Esmectita	80 - 120	40 - 800
Paligorskita-Sepiolita	3 - 20	40 - 180

¿Qué hay del agua?

Se conoce que las arcillas adsorben agua, pero falta conocer cómo interactúa el agua con la arcilla. Excepcionalmente, las esmectitas y vermiculitas son las arcillas más importantes cuando se refiere a la interacción que tienen con el agua. Esta importancia se la otorgan los iones hidratados que presentan en su espacio interlaminar, los cuales exhiben grandes entalpías de hidratación, además de que la arcilla cuenta con fuertes sitios hidrofílicos que permiten la adsorción de agua (Bergaya *et al.*, 2006).

El proceso de adsorción de agua en las arcillas ocurre, primeramente, en la superficie. Este proceso inicia con la solvatación de los iones intercambiables, seguida de la ocupación en el espacio interlaminar. Las moléculas de agua se coordinan con los iones intercambiables provocando que las propiedades químicas y físicas

de ambos sean diferentes al agua pura (sin iones dispersos), es decir, las moléculas de agua se agrupan alrededor del ion proporcionándole una alta polaridad.

La influencia que tiene el agua en la estructura es muy importante, ya que interacciona directamente con los grupos hidroxilos (OH^-) de la superficie interna. Este proceso lo podemos observar en las arcillas del grupo 1:1, los caolines, en donde la halloysita es una forma hidratada de la caolinita, en la cual las moléculas de agua se intercalan formando una monocapa, perturbando a los grupos OH^- de la estructura de la caolinita, provocando que la estructura adopte una forma tubular.

Saber ancestral

Desde la antigüedad, la humanidad ha utilizado materiales que extrae de la tierra para solventar algunas de sus necesidades como la construcción. Hace más de 3000 años, la cultura Olmeca levantaba sus edificaciones con arcillas mezcladas con materia vegetal. Tal era su resistencia, que hoy en día aún se pueden observar estas magníficas edificaciones en la parte sur de Veracruz y Tabasco, en los sitios de La Venta (Figura 30), Tres Zapotes y San Lorenzo. De igual manera, fue la primera cultura en todo Mesoamérica que comenzó a utilizar vasijas de cerámica para contener alimentos y agua.



Figura 30. Cabeza Olmeca encontrada en 1862 en el sitio La Venta, Villahermosa, Tabasco, México. Está esculpida en basalto y pesa aproximadamente 50 toneladas.

Actualmente, se pueden encontrar cerámicas derivadas de las arcillas que son cristalinas, para las cuales no es posible someterlas a muchos procesos físicos o químicos y cerámicas no cristalinas, como los vidrios, que se obtienen a partir del proceso de fundición. No obstante, la cerámica ha pasado por diferentes tipos y formas de procesamiento que, actualmente podemos clasificarlas como (Figura 31):



Figura 31. Clasificación de las cerámicas.

La cerámica de nuestros antepasados involucraba el uso de tres principales materiales como las arcillas, sílices y feldespato, mismos que son materias primas comunes y naturales que encontraban a su alrededor. Esta materia prima se compone principalmente de caolinita, la cual, a una temperatura de 550 °C tiene un proceso de deshidroxilación (pérdida de grupos OH⁻), por lo que la caolinita adopta el nombre de metacaolinita. Cerca de los 980 °C la metacaolinita se transforma en una espinela de silicio y a 1100 °C comienza a transformarse en mulita (porcelanita) mezclada con cuarzo.

Este mismo proceso de transformación ocurre para la mayoría de las arcillas, por lo que, al calentar una arcilla a determinada temperatura, la arcilla se vitrifica, es decir, parte de sus componentes se funden para generar un material vítreo impermeable. Este proceso ocurre entre los 1200 y 1400 °C y es diferente para cada tipo de arcilla. De manera general se tienen cuatro rangos de temperatura que son importantes en las arcillas, de 50 a 120 °C se encuentra el rango de deshidratación, un rango de estabilidad de la arcilla entre 120 y 600 °C, un rango

con una arcilla anhidra entre 600 y 1000 °C y un rango de recristalización arriba de los 900 °C (Velde, 1992).

Para los artesanos y la industria de los cerámicos, el rango entre 600 y 1000 °C es muy importante, debido a que permite transformar la arcilla seca en un material nuevo y más rígido. Este rango toma importancia debido a que en él se agregan otro tipo de materiales no arcillosos que interactúan con la arcilla para formar nuevos minerales o estados físicos (vidrio o nuevas fases cristalinas), pero ¿cómo tomó importancia este rango de temperaturas? Se sabe que, en las arcillas se produce un importante cambio de volumen al recristalizarse en otras fases, perdiendo su agua cristalina por encima de los 1000 °C, es decir, se genera una contracción significativa en la estructura a medida que se pierde esta agua. Esta contracción tiende a ser muy grande por lo que es necesaria la adición de suficientes materiales de varios tipos o, en el caso de la porcelana, cuarzo puro y feldespato alcalino. Así, el uso de utensilios de barro ha sido tan importante que incluso en nuestros días se sigue empleando; por ejemplo, como artesanías de diferentes regiones de México, o simples aditamentos culinarios, como las cazuelas de barro que son utilizadas para preparar alimentos como el mole, o en ollas para preparar café, entre otros.

Utensilios más sofisticados se han construido con arcillas, tal es el caso de la porcelana, misma que para la producción de este material con una alta calidad se requiere que esté totalmente libre de coloración, es decir, que sea completamente blanco. Metales como el Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni y Cu presentan un alto grado de coloración que le otorgan a las arcillas, aumentando su opacidad y generando que la porcelana sea de mala calidad.

Así, gracias a los cambios que se producen en las arcillas por efecto de la temperatura, se han encontrado aplicaciones en el campo culinario y artesanal, pero, además, en otros usos, por ejemplo, en la construcción, como baldosas para recubrimientos, obtenidas de la mezcla homogénea de materiales como los feldespatos, arcillas, arena y carbonatos, los cuales pasan por un proceso de molienda, granulación y compactación, para finalmente ser esmaltados, adquiriendo las formas como las conocemos. Este tipo de baldosas son ampliamente utilizadas debido a su gran resistencia e impresionantes diseños, siendo un material que se ha vuelto distintivo de las decoraciones para interiores y exteriores.

Otro uso que se le ha dado a las arcillas dentro de la construcción se remonta a los antiguos egipcios, que como se ha mencionado, inventaron el ladrillo, el cual, es una mezcla de arcillas como el caolín, montmorillonita y la illita, además

de óxidos de hierro, calcio y magnesio, que pasan por un pretratamiento de maduración y un proceso mecánico para purificar la mezcla, después humedecerla, moldearla y finalmente, secarla y cocerla en temperaturas entre 900 y 1000 °C. Obteniéndose así, este material de construcción que se ha empleado por milenios y que sigue vigente en la actualidad, con diversas formas tamaños y usos.

Desde la antigüedad existen materiales que han permitido unir diversos materiales para construir diversas estructuras. Los antiguos mexicas construyeron calzadas sobre el lago de Texcoco. Estas calzadas fueron hechas con piedras, arcilla y argamasa, mezcladas y sostenidas con pilotes de madera que se sumergían en el lago.

Del mismo modo, cuando los ladrillos fueron inventados, fue necesario fijarlos para formar los muros. Un material que se usa con este fin es el cemento que, conformado por piedra caliza, minerales de hierro y arcillas, ha dado una solución a estos problemas de fijar ladrillos.

Otro tipo de cerámicos que han tenido una mayor trascendencia actualmente, son los biocerámicos, materiales cerámicos que son compatibles con los sistemas vivos. Su uso se extiende en todo el campo médico, encontrando lugar en los implantes de dientes y huesos, además de que también se usan en marcapasos, máquinas de diálisis renal y respiradores. Usualmente se les divide en bioactivos como hidroxiapatita y en bioinertes como cerámica de sílice, el carbón activado o el diamante sintético. Usualmente, las arcillas pertenecen al grupo de materiales bioinertes debido a que son no tóxicas y no causan inflamación en el cuerpo humano, además de que son duraderas, resistentes a fallas estructurales y resistentes a la corrosión (Mukherjee, 2013).

Maestros del calor

Los mexicas extraían metales del suelo para elaborar diversas creaciones artísticas para adornar sus centros ceremoniales. El oro, considerado como excremento amarillo divino o *coztic teocuitlatl*, se trabajaba de diversas maneras para obtener los diversos diseños. La manipulación y extracción de metales la realizaban por dos métodos diferentes, uno en frío y otro en caliente. El método en caliente consistía en emplear una vasija muy resistente al calor, es decir, empleaban hornos u hornillas de barro, en los que se depositaban los minerales para separarlos por acción de la temperatura (De la Cruz Zamora Ayala, 2003). Es claro que la

construcción de estos hornos requería emplear materiales resistentes al calor, por lo que las arcillas desempeñaron un papel importante para este fin (Figura 32).



Figura 32. Orfebre joyero mexicana.

No solo desde la antigüedad se han usado, sino que en nuestra época se siguen empleando en diversas aplicaciones. Dentro de estas aplicaciones, el uso de arcillas como refractarios ha tenido una gran importancia debido a que pueden soportar altas temperaturas y no se fusionan, gracias a su estabilidad química y física, incluso a temperaturas muy altas.

Pero no todas las arcillas presentan estas propiedades, solo las arcillas refractarias son las que más se utilizan con este propósito, encontrando usos en revestimientos para hornos y como materia prima para fabricar otros artículos de alta temperatura como crisoles, entre otros.

Podemos encontrar diversos tipos de refractarios dependiendo de la temperatura que resistan:

- Resistentes a bajas temperaturas: 1520 - 1630 °C
- Resistentes a medias temperaturas: 1630 - 1670 °C
- Resistentes a altas temperaturas: 1630 - 1730 °C
- Super resistentes: > 1730 °C

Dentro de su uso como refractarios se pueden encontrar aplicaciones como las mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de arcillas refractarias, usos y obtención.

Tipo de refractario	Uso	Descripción
Refractarios ácidos: arcilla de fuego (<i>fire clay</i>)	Se usan en áreas donde los desechos y la atmósfera son ácidos. Esta arcilla es estable ante los ácidos, pero se destruye con bases (álcalis).	Presentan propiedades físicas, químicas y mineralógicas muy variadas que dependen de la naturaleza y proporción de sílice y alúmina que contienen.
Refractarios básicos: dolomita, magnesita.	Se usan en áreas donde los desechos y la atmósfera son ácidos o básicos. Esta arcilla es estable ante los ácidos y las bases.	Se producen a partir de la calcinación de la magnesia.
Refractarios neutrales: bauxita, dolomita, lima.	Se usa en áreas donde los desechos y la atmósfera son básicos. Estas arcillas son estables ante las bases (álcalis), pero se destruye ante los ácidos.	Contienen aluminio y calcio.

El astronauta

Historias que se han comentado o se han leído en diversas fuentes, muestran un panorama del espacio exterior que se conoce. Nuestros antepasados también hablaban de las estrellas y lo que está fuera de nuestro planeta. Los mayas, antigua civilización que hoy en día sigue sorprendiendo con sus amplios conocimientos del cosmos, fueron grandes astrónomos que, incluso en su época, ya contaban con un observatorio, ubicado en la zona arqueológica de Chichén Itzá, pero esto no es lo más interesante, existe otra ciudad que nos plantea una gran interrogante. Palenque, con sus grandes construcciones, nos presentó por primera vez a una persona viajando por las estrellas, o al menos eso es lo que se puede interpretar. K'inich Janaa'b Pakal I, quien gobernara Palenque entre los años 615 y 638 a.C., fue sepultado con grandes riquezas y cubierto con una lápida muy especial, en la

cual se grabó toda la cosmología Maya, representando al rey como el centro del universo, ascendiendo por el tronco del *Árbol de la Vida*, renaciendo y reafirmando su eternidad, pero si se le relaciona con los actuales viajes espaciales, se puede observar a un hombre en una nave espacial con detalles como un dispositivo que le ayuda a respirar, pedales y cinturón de seguridad. Además, se observa en el extremo derecho que del vehículo emerge fuego. Esta curiosa relación con los viajeros espaciales fue lo que le otorgó a este rey de Palenque, el título de “el astronauta de Palenque” (Figura 33).



Figura 33. Lápida encontrada en la tumba del rey “Astronauta de Palenque”.

Pero ¿cuál sería la relación del astronauta con las arcillas? Para responder esta interrogante se volverán a considerar las propiedades de las arcillas. Se conoce que existen diferentes tipos de arcillas para diferentes usos. Las que ayudan para que el astronauta pueda salir y entrar del planeta son las arcillas refractarias, las cuales soportan las altas temperaturas que se generan por la fricción del aire, cuando una nave espacial ingresa a la atmósfera del planeta, permitiendo que los componentes y el equipo no se vea alterado por este evento. Por ello, algunos de los usos muy especiales que tienen las arcillas los encontramos en la industria aeroespacial, las cuales, en combinación con otros materiales como los polímeros, logran mejorar sus propiedades fisicoquímicas para ser empleados como recubrimientos de equipos, interiores de aviones, revestimientos, cabinas, equipos de la tripulación, tubos termocontraíbles, espejos resistentes al espacio exterior, carcasas, cubiertas, boquillas y sustratos de paneles solares (Rathod *et al.*, 2017).

Tierra de los dioses

Los mexicas construyeron islas artificiales en medio de un lago, denominadas chinampas, caracterizadas por tener pilotes como estructura base y gruesas capas de tierra y en su superficie, redes a base de juncos con hierbas y barro y lo cubrían con lodo sacado del fondo lacustre (compuesto por arcillas y minerales) que es rico en materia orgánica y nutrientes. Esta fue una forma de utilizar arcillas para promover el crecimiento de las plantas, debido a sus grandes capacidades de absorción de agua y nutrientes, mismas que para la agricultura desempeñaron un papel muy importante.

Tanto en la antigüedad como en la actualidad, su uso en la agricultura ha sido beneficioso. Las plantas no solo viven de los elementos disponibles en el aire como el dióxido de carbono o el nitrógeno, ni de solo agua, por lo que requieren diversos elementos para su correcto crecimiento y bienestar. A medida que pasaron los años, los científicos estudiaron los diversos elementos que componen los suelos, además de estudiar cómo el nitrógeno gaseoso se transmite del aire a la planta y por acción bacteriana se deposita en el suelo; a su vez identificaron los elementos necesarios para que las plantas vivan, como los macronutrientes, en los que encontramos nitrógeno, potasio, fósforo, azufre, magnesio y calcio; y los micronutrientes como el cloro, boro, manganeso, hierro, cobre, molibdeno y zinc. No obstante, el suelo suele variar en composición; lo mismo sucede con las plantas, no todas requieren las mismas cantidades de elementos, es por ello por lo que crecen en diferentes tipos de suelo, por lo que remediar estas carencias de elementos en el suelo se volvió un objetivo primordial para la ciencia.

Las arcillas presentan diferentes elementos que las convierten en excelentes acondicionadores del suelo mejorando su eficiencia, especialmente en el crecimiento y la salud de las plantas y, al mismo tiempo, permitiendo corregir las deficiencias del suelo en estructura y/o nutrientes (Velázquez-Herrera *et al.*, 2022). Además, desde un punto de vista de la construcción, las arcillas también permiten el acondicionamiento del suelo para poder construir edificios, mismo que los antiguos mexicas también las utilizaron con este fin constructivo, en sus calzadas y edificaciones.

Para que las arcillas puedan acondicionar el suelo y lo vuelvan fértil, deben de cumplir algunos requerimientos como (Mukherjee, 2013):

- Gran capacidad para retener agua.
- Poca compactación y generar condiciones tipo “hardpan”.
- Mejorar la estructura y aireación del suelo.
- Reducir la alcalinidad del suelo.
- Permitir mayor disponibilidad de agua a las plantas.
- Mejorar el desarrollo de la raíz de las plantas.
- Mejorar el rendimiento y calidad del suelo.
- Permitir la liberación de los nutrientes retenidos.

Debido a estos requerimientos, no todas las arcillas son indicadas para esta función, algunas como los feldespatos, las moscovitas y las micas presentan potasio en sus estructuras, que permiten nutrir el suelo. Por otro lado, la adquisición de fósforo en el suelo procede de una combinación de las apatitas con una arcilla, por ejemplo, las obtenidas de los fondos marinos que son ricas en este mineral. Mientras que, elementos como el azufre, el suelo los obtiene del yeso mineral.

Cuando las plantas son colmadas de fertilizantes, estas se puede llegar a quemar o pudrir, es por ello que se requiere controlar los excesos que son depositados en los cultivos, por tanto, las arcillas son excelentes para este proceso de almacenar y liberar lentamente fertilizantes en el suelo. Una de las técnicas comunes para este fin, es adsorber previamente el fertilizante en las arcillas y proceder a esparcirlas en los cultivos, la otra opción es por fertiirrigación, la cual, consiste en mezclar los fertilizantes con el agua de riego; en este aspecto, si el cultivo se encuentra en suelos arcillosos, las arcillas absorberán los nutrientes y los liberarán lentamente.

Otro uso dentro de los suelos es el control de contaminantes, debido a que las arcillas son intercambiadoras iónicas, muestran su eficacia en el control de los cationes en solución, aunque, cuando solo interviene el intercambio iónico, su eficacia está determinada por equilibrio entre los iones en solución y los que se encuentran en los sitios de intercambio de la arcilla. No obstante, también pueden absorber en su superficie metales pesados, lo que aumenta su eficiencia para retener contaminantes. Su uso no es limitado a suelos, sino que se extiende a las aguas contaminadas o al aire (Tabla 8) (Bergaya *et al.*, 2006).

Tabla 8. Empleo de arcillas en el control de contaminantes de suelos, aguas o aire..

Tipo de contaminante	Uso potencial	Propiedades relevantes de las arcillas a utilizar
Cationes de metales pesados y cationes simples	En suelos	Carga, área superficial, grupos superficiales reactivos
Cationes orgánicos y biológicos	Control de pesticidas, tratamiento de aguas residuales y purificación de agua	Carga, área superficial y carga interlaminar
Moléculas orgánicas no iónicas	Tratamiento de aguas residuales y purificación de agua, control de pesticidas y revestimiento de residuos	Carga, área superficial y carga interlaminar
Aniones	Tratamiento de aguas residuales y purificación de agua, control de pesticidas y el control de lixiviación de nutrientes en el suelo	Carga
Turbidez y tratamientos químicos residuales	Purificación de agua y algunos tratamientos de aguas residuales	Tamaño de partícula, carga, área superficial
Lixiviados	Almacenamiento de desechos radioactivos	Hinchamiento, carga, área superficial, grupos superficiales reactivos

Las arcillas pueden tener diferentes usos que van desde los más simples hasta los más complejos. Hemos visto algunos de ellos, pero no son limitados, todo depende del tipo de arcilla con la que se cuente y las propiedades particulares que presente. En la Tabla 9 podemos observar diferentes tipos de arcillas y los usos industriales que se les ha dado actualmente (Bergaya *et al.*, 2006).

Tabla 9. Usos actuales de las arcillas en la industria.

Arcilla	Tipo de industria	Uso
Caolín	Papel, plásticos, caucho	Relleno y portador
	Pesticidas	Diluyente
Vermiculita	Construcción y embalaje	Aislantes térmicos, disipadores del sonido, a prueba de golpes, protectores térmicos y absorbedores de líquidos
	Fundiciones	Protectores térmicos
Mica	Industria eléctrica	Aislantes
	Pinturas	Protectores contra rayos UV, estabilizadores térmicos y aditamento de pinturas acuáticas
	Cosmética	Nacarado
	Recubrimientos	Anticorrosivos, revestimiento de polímeros, selladores
Talco, pirofilita	Plásticos, caucho, papel	Relleno
	Cosmética, farmacéutica	Polvos, pastas, ungüentos y lociones
	Refractaria	Refractarios
Palygorskita-sepiolita	Pesticidas	Reservorio de insecticidas y herbicidas
	Química	Reservorio de catalizadores, filtros y antiaglutinantes
	Cosmética y plásticos	Relleno

Pictografía de los dioses

Los antiguos mexicanos emplearon diversos colores para representar a sus dioses, de los cuales, los más frecuentes fueron el ocre, rojo, azul, blanco y negro. El color blanco se obtiene directamente de la calcita, el negro del carbón vegetal, el rojo

de la hematita y el ocre de una mezcla de hematita y titanomagnetita, mientras que el azul, un color muy particular se obtenía de una arcilla proveniente del sur de México, de la región de los mayas, y mejor conocido como el azul maya (Dirección de Medios de Comunicación INAH, 2017).

El azul maya está constituido de colorantes extraídos de las hojas de índigo y mezclados con palygorskita y saponita, las cuales son arcillas que le confieren una gran estabilidad química contra ácidos y bases fuertes, disolventes orgánicos, oxidantes, agentes reductores y biocorrosivos. A partir de esta mezcla, se han encontrado seis tonalidades diferentes de azul maya empleadas en diferentes pinturas. Estas tonalidades eran generadas por la mezcla de azul con otros minerales, mismos que incluso, podían generar otros colores como el verde, que era obtenido al mezclar el azul maya con un mineral de color amarillo. No obstante, el uso del azul maya no quedó guardado en la antigüedad, sino que en la actualidad se le ha dado diferentes usos, debido a que su producción es amigable con el ambiente, además de que se puede variar su coloración y tiene excelente estabilidad química, encontrado aplicaciones enfocadas a los recubrimientos protectores e inteligentes, además de que evitan la corrosión y presentan propiedades fotocatalíticas y de adsorción (Dong & Zhang, 2019) (Figura 34).



Figura 34. Mural con figura en azul maya.

Desde nuestros antepasados, el uso de arcillas en pinturas se ha diversificado, tanto que en la actualidad se pueden encontrar arcillas como los caolines, que

se utilizan para modificar el brillo, la fluidez, manejo y propiedades de las pinturas. Además, la bentonita es empleada para incrementar la viscosidad, reducir el descuelgue en superficies verticales y prevenir la sedimentación de pigmentos y masillas. Por otro lado, las arcillas también son empleadas como pigmentos en tintas, para obtener diversas coloraciones como verde, rojo, amarillo y café, además del blanco, dependiendo de la arcilla que se use.

La energía de los dioses

El copal, olor que se ha utilizado por cientos de años para aromatizar las ofrendas de día de muerto, es una resina vegetal producida por el árbol *Bursera*, originario de tierras calientes y húmedas como las de los estados de Guerrero, Morelos, Puebla y Oaxaca (García González, 2015). Nuestros antepasados lo conocían como *copal-quáhuítl*, “árbol de copal” y a la resina como *copalli*, “incienso” (García González, 2015). Los antiguos mexicas empleaban un sahumerio para poder sahumar los altares y así purificarlos. Este objeto consistía de una pieza de barro similar a la de una cuchara grande, compuesto por una cazoleta hemisférica y un mango largo hueco que sirve para sostenerlo, la cual, era transportada por un *tlémaitl* (manos de fuego), que en un plano metafórico era el portador del fuego sagrado (García González, 2015) (Figura 35). En otras palabras, los sahumerios permiten contener el fuego, es decir, la energía para que perdurara el fuego y fuera posible transportarlo de un lugar a otro.



Figura 35. Mexica transportando un sahumerio para purificar el altar en un día de ofrenda (Códice Fejérváy-Mayer, lámina 27).

Desde que nuestros ancestros utilizaban arcillas para contener fuego (no de manera literal), en la actualidad aún se puede ver esta tradición de sahumar los altares de día de muertos. No obstante, cuando se trata de almacenar otro tipo de energía, las arcillas han sido un gran apoyo gracias a la enorme cantidad de calor latente que albergan. Esta propiedad se puede atribuir a su estructura porosa y a su área superficial específica. Por lo que a altas temperaturas presentan un cambio de fase que los hace materiales ideales para la conservación de la energía en los edificios. Un ejemplo de estas arcillas es la caolinita, la cual, combinada con otros materiales como la parafina, son candidatos prometedores para sistemas solares de calentamiento de agua, sistemas de secado solar, sistemas de transporte de calor residual, entre otros. Estos materiales tienen una buena función de almacenamiento de energía térmica para la calefacción, ventilación y aire acondicionado en las envolturas de los edificios debido a su alto rendimiento de reutilización y gran conductividad térmica (Cheng *et al.*, 2019a). El mismo caso sucede con la vermiculita expandida, la paligorskita (W. Wang & Wang, 2019) y la rectorita (Deng *et al.*, 2019), las cuales son arcillas naturales capaces de almacenar calor del ambiente.

Asimismo, las arcillas pueden mejorar el depósito de otro tipo de energías, como la energía electroquímica. Las baterías de litio-azufre son uno de los sistemas más prometedores para almacenar energía, pero presentan grandes desventajas como la generación de reacciones parásitas entre los ánodos de litio y los polisulfuros generados en la batería. Esta desventaja es fácilmente solventada cuando se emplea un ánodo basado en una arcilla, la vermiculita, la cual permite regular el transporte de iones polisulfuro a través de la repulsión electrostática y el impedimento estérico, no obstaculizando el transporte de iones Li, evitando el efecto “lanzadera” (Cheng *et al.*, 2019b).

Otra importante aplicación de acunulación de energía es el almacenamiento de hidrógeno, para el cual, arcillas como bentonita, sepiolita y laponita, se han utilizado para el depósito de este elemento en su forma molecular (Gil & Vicente, 2019).

Esta capacidad de almacenamiento de energía se debe principalmente a la capacidad de las arcillas para no responder a un campo eléctrico y resistir completamente el flujo de carga eléctrica, en otras palabras, en algunas arcillas, los electrones de valencia están fuertemente unidos a sus átomos, por tanto, no permiten el flujo de carga eléctrica, generando un material aislante que permite almacenar energía.

Muchos de los aislantes que se utilizan para la transmisión de energía de alta tensión están hechos de porcelana, vidrio o materiales poliméricos compuestos. Los aislantes de porcelana, como se ha mencionado, se fabrican con arcillas, cuarzo, alúmina y/o feldspatos, los cuales, para esta aplicación de aislantes, se recubren con un esmalte suave para que se pierda el agua. Cuando el aislante de porcelana se encuentra enriquecido con alúmina, genera un material que es excelente para emplearse cuando la resistencia mecánica es un criterio importante para alguna aplicación. La ciencia nos ha demostrado que la porcelana tiene una resistencia dieléctrica entre 4 y 10 kV/mm (Mukherjee, 2013). Una característica muy importante que diferencia a la porcelana de los aislantes de vidrio, es que la porcelana no atrae por condensación al agua como el vidrio. Además, permite moldearse en formas gruesas e irregulares necesarias para un buen aislante, a diferencia del vidrio que durante el proceso de fundición genera muchas imperfecciones internamente, sobre todo si se generará una forma muy gruesa. Gracias a estas características, en la actualidad los fabricantes prefieren usar materiales cerámicos en lugar de vidrio para producir sus aislantes.

Remedio de los dioses

Para los antiguos mexicas, la práctica terapéutica estaba envuelta en la magia, que mezclaba conocimientos de la experiencia y la religión, además de que estaba muy presente en los métodos curativos de los médicos antiguos debido a que se creía que la enfermedad solía atribuirse al hechizo de algún brujo o, en el peor de los casos, la maldición de algún dios (Pijoan, 2003).

Las plantas jugaron un papel importante para tratar las diversas enfermedades en la época antigua, no obstante, los mexicas, llegaron a emplear materiales obtenidos de la tierra para curar algunas enfermedades, como la fiebre y el espanto causado por el trueno, los cuales eran curados con una “piedra de lluvia” “que caía de las nubes, penetraba dentro de la tierra y engordaba de año en año”, además, curaban hemorragias nasales con una “*piedra de sangre*” (Pijoan, 2003) (Figura 36). Por otro lado, los mayas, ubicados al sur de México, también empleaban a las arcillas con fines medicinales. La paligorskita no solo se empleaba en la producción del azul maya, también era empleada como un material antidiarreico muy útil.



Figura 36. Práctica terapéutica de los mexicas empleando la “pedra de lluvia”.

En la actualidad, su uso en la medicina ha cautivado la atención de las personas y los científicos. Una técnica especial que se emplea actualmente es la terapia de arcillas, la cual se basa en su capacidad para adsorber y retener sustancias nocivas y tóxicas. Además, otro uso importante que se la ha dado es en el tratamiento de trastornos gastrointestinales, para la cual, desde la antigüedad, se han usado arcillas como la bentonita o la caolinita. Dentro de este ámbito, la montmorillonita y la caolinita han tenido gran importancia por su habilidad de adsorber microorganismos como bacterias y virus que afectan el tracto gastro intestinal de las personas.

Siguiendo esta línea de problemas gastrointestinales, arcillas como las esmectitas se han empleado para el control de flatulencias y la distensión abdominal. Asimismo, esta arcilla se ha usado para adsorber diversas toxinas (Mukherjee, 2013). Además, también pueden proporcionar protección contra el ataque de los ácidos biliares que causan la ulceración gastrointestinal debido a sus fuertes propiedades bioadhesivas protegiendo también el colon contra los daños provocados por las especies reactivas del oxígeno que se generan por lo que consumimos.

Por otro lado, debido al incremento de la población, las necesidades agroalimentarias han tenido que tomar diversas medidas para incrementar su producción. Una de estas medidas es el uso de diversos pesticidas para el control de plagas que afectan a los cultivos. El uso de estos llega a ser mortal para las personas, por lo que arcillas como la bentonita son empleadas para adsorber los pesticidas del organismo y ayudar en su tratamiento.

Farmacéuticamente, las arcillas se han utilizado ampliamente debido a su gran capacidad de adsorción y a su nula toxicidad para el ser humano. Arcillas como la caolinita, sepiolita, talco y paligorskita, se han empleado como principios activos y/o excipientes en diferentes formulaciones, además de que el uso de arcillas proporciona protección contra los efectos secundarios de los antiinflamatorios como la aspirina (Bergaya *et al.*, 2006).

Intermediarios de la transformación

Mayahuel, la encarnación divina del agave que los mexicas conocían se encontró en el cielo con Ehécatl, dios del viento y avatar de Quetzalcóatl y éste la llevó consigo a la Tierra, donde ambos se transformaron en ramas entrelazadas. La abuela de Mayahuel, enfurecida al notar que había desaparecido, descendió a la Tierra y dispuso que se le diera muerte a la inocente doncella; el dolido Quetzalcóatl decide sembrar los restos de Mayahuel en la tierra y así nace, por intervención divina, la planta del maguey, dadora de un líquido de connotaciones sagradas, mejor conocido como pulque. Esta sustancia es una bebida embriagante que se extrae del maguey (agave) por un tlachiquero y la lleva a un tinacal, o sea, el lugar donde se fermentará el aguamiel extraído; este líquido se colocaba en ollas de cerámica para comenzar así, el proceso bioquímico que dura de uno a dos días (Fournier García & Mondragón Barrios, 2012). Otros procesos similares al del pulque se utilizaron para el cacao y la vainilla.

Este fue uno de los primeros procesos de los mexicas que involucraba la acción de enzimas para poder obtener el pulque. Este proceso bioquímico recibe el nombre de catálisis enzimática, es decir, las enzimas actúan como catalizadores que favorecen la producción del pulque. Además, el usar las vasijas de barro, lo que le confería, al pulque, un sabor característico, digno de los dioses (Figura 37).

En la actualidad, las arcillas juegan un papel importante siendo catalizadores, es decir, intervienen en el curso de una reacción específica. Un claro ejemplo se puede ver en la industria petrolera, principalmente en el proceso de craqueo, donde las arcillas fueron los principales catalizadores durante muchos años, hasta que llegaron otros materiales que eventualmente las remplazaron.

Así, el uso de arcillas como catalizadores ha permitido que se comiencen a aprovechar sus grandes beneficios, debido a que a menudo muestran una selectividad hacia un producto, una región o una forma que se esté buscando. No

obstante, en ocasiones las arcillas pueden presentar una pequeña limitante en cuanto al tamaño de sus partículas. Esto se puede solventar adecuándolo para satisfacer las necesidades de la reacción química a desarrollar.



Figura 37. Vasija de barro para curar pulque frente a Mayahuel
(Códice Vaticano B. Lam. 56).

Por otra parte, otra propiedad que no ha sido completamente estudiada se enfoca en la estabilidad de las arcillas a condiciones de presión y temperatura rigurosas en una serie de reactores, mismos que pueden llegar a presentar con la exposición a los reactivos/solventes/productos, lo que puede afectar a la integridad mecánica de cualquier catalizador. Para poder solucionar este problema se requiere del uso de diversos soportes para depositar a la arcilla, tal es el caso de la generación de membranas, algunos gránulos, entre otras, los cuales pueden sobrevivir a las condiciones de procesamiento industrial.

Una de las facilidades que proveen las arcillas es que se pueden tratar con ácidos o intercambiar con iones de metales de transición o iones catalíticamente activos, para aumentar la acidez de Brønsted o Lewis y encontrar aplicaciones en diferentes tipos de reacciones, como catalizadores muy efectivos, en reacciones redox, reacciones que implican intermedios reactivos y cicloadiciones (como las reacciones de Diels-Alder), además de otras (Bergaya *et al.*, 2006).

Considerando que pueden llegar a tener una elevada área superficial, pueden actuar como soportes eficaces para reactivos (normalmente inorgánicos), u otros materiales, lo que aporta las ventajas de la catálisis heterogénea a varias reacciones importantes, debido a que se pueden generar una gran variedad de sitios activos.

Otra característica muy importante en esta aplicación es que las láminas de las arcillas se pueden expandir, permitiendo ser anfitriones bidimensionales que facilitan la introducción de complejos metálicos catalíticamente activos por métodos de intercambio de cationes y ligandos, lo que genera una catálisis de reconocimiento molecular, es decir, permiten la selectividad de forma, estereoselectividad y regioselectividad, por lo que sus aplicaciones llegan más allá de reacciones como la hidrogenación asimétrica, la hidrogenación regioselectiva, la carbonilación regioselectiva y la arilación estereoselectiva.

Generar actividad catalítica a partir de arcillas no es un gran problema. Muchas interrogantes se generan cuando una reacción química está implicada; por lo que la aplicación de las arcillas aún tiene muchísimas reacciones químicas que pueden llegar a usarlas como catalizadores.

Un caso muy usual, son las tierras de blanqueo, también conocidas como tierras del batán (*fuller's earth*) o arcillas de blanqueo. Son arcillas que se emplean para clarificar y reducir el color intenso de las grasas y aceites, es decir, purifican el aceite debido a su gran área superficial y porosidad, adsorbiendo los pigmentos de color presentes, como los carotenos, luteínas y clorofilas. Además de adsorber otros compuestos como los fosfolípidos procedentes del proceso de desgomado, trazas de metales, peróxidos, hidroperóxidos, aldehídos y cetonas (Haro *et al.*, 2014). Este tipo de arcillas son una mezcla de montmorillonita cálcica y atapulgita (paligorskita) que actúan llenando sus poros intergranulares, filtrando así, los compuestos antes mencionados; además actúan como catalizadores degradando los peróxidos adsorbidos. Para que sean adecuadas en el proceso de blanqueo de aceites, es necesario activarlas en un medio ácido, generando así, tres tipos de arcillas de blanqueo:

- pH 6 — 8: Empleadas para aceites orgánicos extraídos de la palma, girasol sin clorofila y grasas animales con bajo contenido de colágeno.
- pH 4 — 6: Se usa para aceites bajos en clorofila como los extraídos de la soya, el maíz, el girasol, etcétera.
- pH 2 — 4: Es ideal para aceites con alto contenido de clorofila como la soya, canola o la colza.

Con esto se puede observar que cada nivel de activación nos dará un nivel de efectividad que tenga el uso de las arcillas para el blanqueo de aceites.

Volviendo al inicio, los mitos antiguos nos describían el inicio de la humanidad a partir de las arcillas, a pesar de ser solo mitos, podemos hacer uso de ellos. Se sabe que los efectos de las propiedades catalíticas de las arcillas tuvieron una gran importancia en las primeras etapas de la historia de la Tierra, cuando las condiciones de la superficie eran muy diferentes de las actuales. Muchos estudios se desarrollaron para comprender cómo los nucleidos o sus derivados podían ser adsorbidos en el espacio interlaminar o en la superficie externa de las arcillas y posteriormente concentrarse para desencadenar su polimerización, permitiendo así que las arcillas asuman el papel de pantallas de protección de las moléculas “prebiológicas” de la degradación bajo el efecto de la radiación ultravioleta (Meunier, 2005), por lo que, en efecto, las arcillas sí pudieron ser parte de la creación de la vida en nuestro planeta.

Sin olvidar

Dadas las multifuncionalidades de las arcillas, aún quedan muchísimas aplicaciones que faltan por descubrir, desde los usos más simples hasta los usos más complejos, por ello algunas aplicaciones más modernas se registran en la Tabla 10.

Tabla 10. Usos y especificaciones más actuales de las arcillas.

Uso	Especificación
Hojas de cuchillos	La hoja de cerámica en un cuchillo que permanece afilada por mucho más tiempo que las metálicas. No obstante, es más débil y se rompe cuando se deja caer en una superficie dura.
Discos de freno para vehículos	Son empleadas debido a su resistencia a la abrasión en altas temperaturas
Desarrollo de compósitos avanzados	Se utilizan como blindaje para vehículos de pelea
Esferas de cerámicas	Empleadas en baleros donde su resistencia química y estabilidad a la corrosión por humedad las hacen un material muy eficiente

Cerámica de alta tecnología	Se usan en la fabricación de relojes debido a su bajo peso, su resistencia a los rayones y gran durabilidad
Motores tipo turbina	Estos motores operan más eficientemente proporcionando ligereza y permiten almacenar más combustible
Aviación y aeroespacial	Con ellas es posible desarrollar sistemas de almacenamiento criogénico
Empaques	Funcionan muy bien como empaques de comida y bebidas
Retardantes de flama	Su uso como recubrimientos permite reducir la flamabilidad de viviendas
Transbordadores y cohetes espaciales	Constituyen los revestimientos exteriores capaces de resistir el intenso calor generado al reingresar a la atmósfera terrestre

Sin olvidar que las arcillas se han empleado en diversos tratamientos de belleza, debido a que presentan efectos purificantes y antibacterianos en la piel. Además, son muy buenas para tratar lesiones y dolencias por su buen efecto cicatrizante, mostrando resultados muy sorprendentes.

Alterando arcillas

La gran ciudad de Tenochtitlán, la capital más importante del antiguo imperio prehispánico fue fundada en un entorno lacustre, es decir, sobre un lago, para ello se tuvieron que implementar técnicas que pudieran sostener grandes estructuras. Así, surgen las primeras cimentaciones en territorio mexica, las cuales consistía en colocar pilotes de madera que se cortaban en estacas y se llevaban al fondo del lago, rellenando el espacio que ocupaban con tierra y roca volcánica, lo que les confería fuerza para poder asentar una plataforma (Figura 38). En estas plataformas se generaron las grandiosas edificaciones y las principales calzadas de la gran ciudad, de las cuales, aún en la actualidad podemos observar vestigios de

ellas. Estos magníficos desarrollos permitieron que las edificaciones de nuestros antepasados se mantuvieran en pie. De la misma manera como ellos aplicaron estos soportes a sus construcciones, en una arcilla podemos replicar esta técnica, solo que de manera más pequeña y con otros fines.

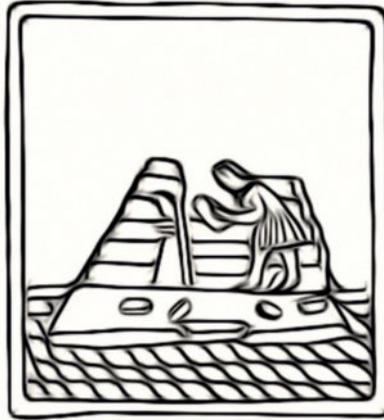


Figura 38. Técnica de construcción de los mexicas con arcillas
(Códice florentino Lib. XI, fol. 241r).

Dentro de todo lo referente a las arcillas, se ha visto que pueden ser muy variadas y con diferentes propiedades y características, por tanto, una característica que se ha desarrollado es que las arcillas se pueden modificar de diferentes maneras, dado que son materiales versátiles con varias posibilidades para modificar su estructura, composición y textura. Una de las modificaciones más estudiadas e importantes es el pilareo (un anglicismo usado para esta modificación de arcillas que es derivado de “pillared”), la cual consiste en formar pilares dentro de la estructura de una arcilla y así generar lo que se conoce como una arcilla pilareada (o arcilla con pilares). Esta modificación, que surgió en el siglo XX cerca de los años 60, se traduce del inglés “pillared interlayered clays” (o PILC’s por sus siglas en inglés) será la protagonista de esta sección dedicada a la modificación de las arcillas.

Pilares de una arcilla

Los pilares dentro de una arcilla se obtienen a través de la introducción de compuestos inorgánicos, orgánicos u organometálicos de tamaños nanométricos

entre las láminas. Estos compuestos actúan como pilares que generan un espacio fijo entre las láminas, lo que produce lo que conocemos como microporosidad. Más a detalle, la microporosidad la podemos encontrar en los espacios que hay entre las láminas de la arcilla (D) y entre los pilares (E) como se representa en la Figura 39 (Pergher *et al.*, 2005).

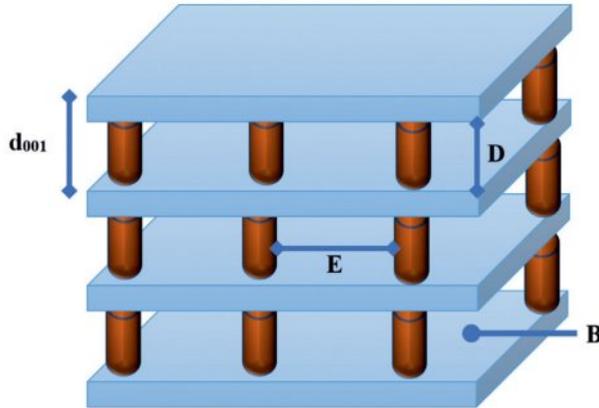


Figura 39. Representación de una arcilla con pilares, la cual puede ser asociada con la estructura basal de un edificio (estructura sin paredes), pero a microescala. D representa la distancia entre las láminas, E es la distancia entre los pilares, B es el espacio interlaminar y d_{001} es la distancia interlaminar o distancia basal (Pergher *et al.*, 2005).

Este proceso, que ha sido muy importante para que las arcilla sean aplicadas en diversos campos, requiere varios procesos para que se puedan obtener pilares que cumplan con las características necesarias para su uso. Para comprender esto, se debe retomar algunos puntos característicos de las arcillas, como lo es la capacidad de intercambio iónico.

El intercambio iónico de una arcilla

Las arcillas son sólidos que presentan átomos firmemente ligados entre sí en dos direcciones del espacio, lo que origina sólidos bidimensionales con una estructura laminar y que han sido las protagonistas de estas páginas.

En las arcillas con láminas eléctricamente neutras, como la pirofilita, la región interlaminar se encuentra vacía y las láminas adyacentes se mantienen unidas

mediante interacciones débiles como las fuerzas de Van der Waals, lo que facilita la incorporación de especies neutras entre las láminas, originando una arcilla intercalada con una determinada microporosidad.

Las arcillas que presentan láminas cargadas eléctricamente, como las arcillas cationicas de tipo esmectitas, tienen cationes intercambiables que también se conocen como cationes de compensación de cargas. Estos cationes tienen la característica de que se pueden sustituir por otros cationes de manera más sencilla si se comparan con las arcillas de carga neutra, además, esta sustitución resulta en una más fuerte interacción con las láminas, debido al carácter electrostático de los enlaces. Por tanto, la arcilla resultante de esta modificación estructural y composicional (dado que se cambian algunos elementos) se conoce como arcilla intercalada y, tanto sus propiedades y características dependen del tipo de especie de intercalación (catión sustituido), su distribución en el espacio interlaminaar y de su tamaño. Si se remonta al pasado siglo XX, el concepto de arcilla intercalada tuvo sus primeros indicios en el año de 1955, el cual, fue publicado este concepto en un artículo por el profesor Richard M. Barrer de la Universidad de Aberdeen en Escocia. En el artículo de Barrer, publicado en la revista *Transactions of the Faraday Society* de la Real Sociedad de Química del Reino Unido, se describe cómo, en una montmorillonita, la sustitución de cationes inorgánicos por cationes orgánicos de tipo alquilamonio expandía las láminas y provocaba cambios profundos en la morfología y porosidad y además de otras propiedades. A pesar de las prometedoras propiedades como tamices moleculares, las arcillas de tipo esmectita como la montmorillonita, intercambiadas por iones de alquilamonio, no tuvieron mucho impacto y su innovación no se desarrolló durante dos décadas debido, sobre todo, al descubrimiento de las zeolitas sintéticas. Estos tamices moleculares (zeolitas) puramente inorgánicos tenían áreas superficiales y volúmenes de poros comparables a las arcillas intercaladas de Barrer, pero eran mucho más estables térmicamente en comparación a las formas de arcillas esmectitas intercambiadas por iones orgánicos (Gil *et al.*, 2010).

Las arcillas intercaladas son normalmente materiales inestables químicamente y con estructuras flexibles, debido a que las especies interlaminaares (cationes) se enlazan débilmente a las láminas y, por ende, se pueden intercambiar una infinidad de veces. Además, también presentan moléculas de agua u otros líquidos de solvatación que pueden entrar y salir de los espacios interlaminaares, ocasionando modificaciones estructurales con carácter reversible.

Formando pilares en una arcilla

A medida que la humanidad ha estado presente en el planeta Tierra, ha requerido emplear diversos procesos y técnicas para poder mejorar su entorno, tal es el caso de nuestros antepasados. Como ya se mencionó, los antiguos mexicas, construyeron su capital en la isla de Tenoch, ubicada en el extinto lago de Texcoco. Iniciaron la gran ciudad de Tenochtitlán (*lugar donde los cactus crecen sobre las rocas*) con la construcción de pequeñas cabañas de caña y un santuario provisional de madera y paja en honor a Huitzilopochtli; posteriormente, hubo la necesidad de remplazar estas estructuras por otras que fueran más resistentes a las diversas adversidades que podrían llegar a tener. Con esto se dio origen a lo que conocemos que fue el Templo Mayor y las edificaciones a su alrededor de la gran Tenochtitlán.

Así, del mismo modo que los mexicas optimizaron sus estructuras, las arcillas necesitan mejorarse para poder tener una aplicación en específico. Para ello, una de las mejoras que se le pueden hacer, es la de generar una estructura más estable, dando origen a las arcillas pilareadas, en donde los elementos constituyentes de las especies interlaminares se enlazan covalentemente con las láminas, dando así, origen a las arcillas con estructura rígida y químicamente estable. Para poder llegar a este tipo de condiciones es necesario aplicarles un tratamiento térmico y así fijar los cationes que asemejan a los pilares de los edificios.

El concepto de arcilla pilareada surgió en 1977 con George W. Brindley y R. E. Sempels, los cuales, demostraron la sustitución parcial de cationes de intercambio de Na^+ por policationes de hidroxialuminio en las galerías de una arcilla conocida como beidelita, generando así, arcillas pilareadas, las cuales presentaron áreas superficiales de hasta $500 \text{ m}^2/\text{g}$ después de aplicarles un tratamiento térmico a $325 \text{ }^\circ\text{C}$. Este hallazgo originó la invención de una patente en el año de 1978 de la W.R. Grace Company, en donde David E. W. Vaughan, Roger J. Lussier y John S. Magee, Jr., tocaron el tema de “Materiales de Arcilla intercalados con Pilares útiles como Catalizadores y Sorbentes”. Este avance, a través de modificaciones químicas, estructurales, morfológicas y texturales de las arcillas, dio lugar a una oleada de infinidad de actividades de investigación que se prolongaron hasta nuestros días (Gil *et al.*, 2010).

Con base en lo que se puede leer en estos párrafos, se tienen dos procesos importantes para la obtención de arcillas intercaladas y pilareadas, los cuales se conocen como intercalación y pilareo, los que se representan en la Figura 40.

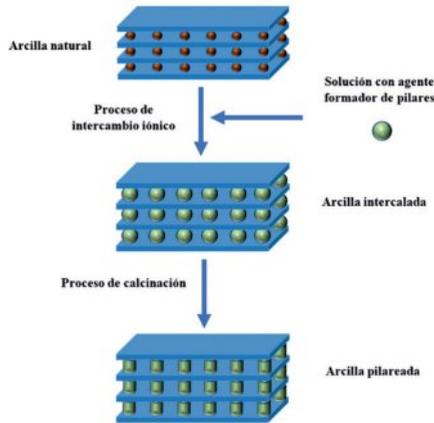


Figura 40. Representación de los procesos de obtención de una arcilla intercalada y pilareada.

Teniendo en cuenta la gran importancia de las arcillas pilareadas para aplicaciones en varios campos de las ciencias o incluso en medicina, se deben describir los tipos de arcillas que se pueden pilarear, algunos procedimientos de preparación de los pilares y los pilares más empleados en este proceso.

Muchas estructuras requieren ser soportadas mediante pilares que mantengan en pie la estructura, el mismo caso sucede con las arcillas, si se quieren mantenerlas estables, se deben construir pilares. Para la construcción de pilares, se requiere una técnica que ha sido muy estudiada, la cual consta, de manera general, de un intercambio iónico de los cationes originales que se encuentran en el espacio interlaminar, que normalmente son sodio y/o calcio, por especies oligoméricas voluminosas como lo son los polioxocaciones metálicos. Al calcinarse, los polioxocaciones insertados dan lugar a especies de polióxidos rígidos y térmicamente estables que separan las capas de arcilla y evitan su colapso. La intercalación y la formación de pilares producen una estructura porosa con la presencia de sitios superficiales particulares. El espacio interlaminar originalmente cercano a 3 \AA puede alcanzar un valor tan alto como 20 o 30 \AA . Las arcillas pilareadas pueden ser diseñadas en función de la aplicación, es decir, los tamaños de poros deseados se pueden programar a partir de la selección de pilares que vayan a formar el tamaño esperado. Además, la composición química de la arcilla puede ser modificada y programada particularmente para reacciones específicas, en el caso de aplicaciones como catalizadores o adsorbentes, por mencionar algunas.

La gran mayoría de las investigaciones que se enfocan en formar pilares en las arcillas, emplean arcillas naturales como materia prima debido a su gran abundancia en la naturaleza y su bajo costo. No obstante, las arcillas sintéticas también han tenido una gran atención, sobre todo para aplicaciones en catálisis que demandan materiales de muy alta pureza. Entre el gran número de arcillas existentes en la naturaleza, las de tipo esmectitas son las más utilizadas en la química de formación de pilares, dadas sus altas capacidades de intercambio iónico y grado de hinchamiento, que son características de este tipo de arcillas. Dentro de las esmectitas, la montmorillonita es la más indicada para formar pilares, pues se encuentra en forma relativamente pura en muchos yacimientos por todo el planeta. Están conformadas por partículas muy pequeñas (entre 0.5 y 2 μm) y presentan una alta capacidad de intercambio iónico (200 meq/g). Además, son sólidos de carácter ácido, en donde esta acidez puede ser modificada y regulada por varios métodos. Entre ellos se encuentran: (i) intercambio iónico con cationes inorgánicos multivalentes y complejos de coordinación para incorporar especies redox y generar simultáneamente centros ácidos; (ii) tratamiento con especies inorgánicas polihidroxocationicas seguido de un tratamiento térmico para obtener arcillas pilareadas con acidez de Lewis; (iii) tratamiento con ácidos minerales, orgánicos o con tensioactivos para obtener arcillas ácidas con porosidad variable; (iv) remoción del aluminio estructural mediante tratamiento con ácidos débiles para generar porosidad y acidez de Brønsted (Kurian & Kavitha, 2016) (Figura 41).

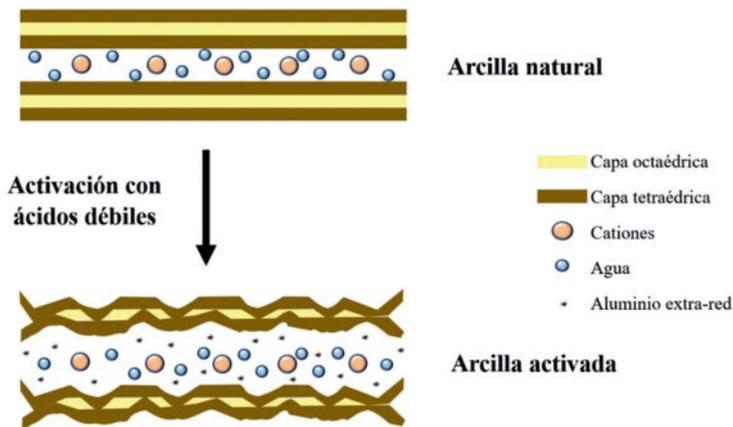


Figura 41. Proceso de activación de arcillas.

Otros tipos de arcillas usadas para el pilareo, pero en menor escala que la montmorillonita, son la beidelita, saponita, hectorita, nontronita, entre otras.

El primer paso en la preparación de las arcillas con pilares se basa en la preparación de los agentes que formarán los pilares. En este paso, una solución que contiene los precursores (iones) de los pilares, llamada también solución de intercalación, se somete a reacciones de hidrólisis, oligomerización y complejación, originando los polioxocaciones que son grandes complejos inorgánicos (aprox. 10 Å) constituidos por grupos de átomos de oxígeno, hidroxilos y un metal. Las condiciones en el proceso de hidrólisis, como la temperatura, el pH y el tiempo de envejecimiento, juegan un papel importante en la formación de los agentes de intercalación o precursores de los pilares. Por ejemplo, en la preparación de pilares de polioxocaciones de aluminio (conocidos como Al_{13} que presentan estructuras de *Keggin* ($[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$), se mezcla una solución básica de NaOH o de Na_2CO_3 con una solución de $AlCl_3$ o de $Al(NO_3)_3$ con proporciones molares OH^-/Al^{3+} entre 0.5 a 2.5. La solución mixta resultante se somete a tratamientos para la formación de los agentes de intercalación por reacciones de oligomerización o polimerización. Estos tratamientos pueden ser efectuados por agitación de la solución desde temperatura ambiente hasta cerca de los 100 °C, a diferentes presiones y tiempos de reacción. El proceso convencional implica tiempos prolongados de cerca de 24 h, dificultando su aplicabilidad a gran escala. Los tratamientos con irradiación de microondas o ultrasonido reducen considerablemente el tiempo de síntesis llegando a formar las especies en apenas 30 minutos o menos (Baloyi *et al.*, 2018).

Existen diferentes pilares que han sido estudiados y aplicados a las arcillas que cumplen determinadas características como una longitud variable, que sea soluble en agua o algún solvente, una carga eléctrica positiva y que se puedan descomponer en otra especie más estable cuando se somete a un tratamiento térmico o por otro proceso. Las características más importantes para la utilización como pilares son:

- a) El tamaño de la especie de pilareo: determina el tamaño de los nanoporos interlaminares.
- b) La estabilidad térmica: influencia en aplicaciones catalíticas, por ejemplo.
- c) La composición química: determina la aplicación para el material.

Por ello solo algunos compuestos pueden formar los pilares, tal es el caso de los que se muestran en la Tabla 11 (Cool & Vansant, 2001).

Tabla 11. Tipos de pilares comúnmente empleados en la pilarización de arcillas.

Clase	Ejemplo
Compuestos orgánicos	Alquilamonio Dialquilamonio Trietilendiamina
Compuesto de coordinación	Tris(etilendiamino)cobalto (III) $[\text{Co}(\text{en})_3]^{3+}$ Complejos de metal-(2,2-bipiridina) Complejos de metal-(o-fenantrolina) Tris(acetilacetonato)silicio (II) $[\text{Si}(\text{acac})_3]^{3+}$ $[\text{Fe}_3\text{O}(\text{OCOCH}_3)_6\text{CH}_3\text{COOH}]^+$
Grupos metálicos	$[\text{Nb}_6\text{Cl}_{12}]^{n+}$ $[\text{Ta}_6\text{Cl}_{12}]^{n+}$ $[\text{Mo}_8\text{Cl}_8]^{4+}$
Polioxocaciones	$[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ $[\text{Zr}_4(\text{OH})_8(\text{H}_2\text{O})_{16}]^{8+}$ $[(\text{TiO})_8(\text{OH})_{12}]^{4+}$ $[\text{Cr}_n(\text{OH})_m]^{(3n-m)+}$ Sales de Fe hidrolizadas
Óxidos coloidales (O-sols)	TiO_2 TiO_2 - SiO_2 coloidal $\text{Si}_2\text{Al}_4\text{O}_6(\text{OH})_8$ o imogolita
Pilares de óxidos mixtos	Fe/Al Fe/Cr Fe/Zr La/Al $[\text{GaAl}_{12}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ Cr/Al LaNiO_x

Como se observa, las especies que pueden formar pilares son diversas, pero solo algunas son las más empleadas en este proceso, las cuales se describen más detalladamente a continuación:

- **Óxidos de aluminio:** la especie existente en mayor cantidad es conocida como Al^{13} , una estructura de Keggin con la fórmula $[Al_{13}O_4(OH)_{24} \cdot 12H_2O]^{7+}$ (Gil *et al.*, 2011). Este ion está conformado por un átomo de aluminio en coordinación tetraédrica rodeado por 12 iones de aluminio en coordinación hexaédrica definidos por grupos OH^- y moléculas de agua, como se representa en la Figura 42.

Cuando este ion se calcina en temperaturas entre 500 y 700 °C, ocurre la deshidratación y deshidroxilación formando núcleos poliatómicos de tamaños nanométricos de óxidos de aluminio que se mantienen unidos fuertemente con las láminas de la arcilla. Las arcillas resultantes con estos pilares presentan alta acidez que es debida, de una parte, al aluminio tetraédrico y, por otra parte, por la arcilla huésped, la cual presenta normalmente acidez intrínseca. Con esta acidez, este material encuentra aplicaciones en la catálisis heterogénea para procesos de hidrodesulfuración, craqueo catalítico en lecho fluidizado, entre otras, debido a que presentan una estabilidad térmica de hasta 700 - 800 °C, gran área superficial específica (de hasta 500 m²/g) y tamaños de poros interlaminares de hasta 12 Å (Pergher *et al.*, 2005).



Figura 42. Estructura del ion Keggin.

- **Óxidos de silicio:** son generalmente obtenidos por oligomerización en un medio ácido con $Si(OR)_4$, en donde R es un agente de silicio como el 2-(2-triclorosilietil)piridina (TCSEP) o el 3-aminopropiltrimetoxisilano (APTMS). La ventaja

que ofrecen este tipo de pilares es que se quedan más distanciados unos de los otros por efecto de los radicales R (Figura 43). Cuando son calcinados en altas temperaturas, las especies formadoras de pilares se reducen a óxidos, originando áreas superficiales muy grandes cercanas a los 600 m²/g y distancias interlaminares de hasta 23 Å (Fetter *et al.*, 1994).

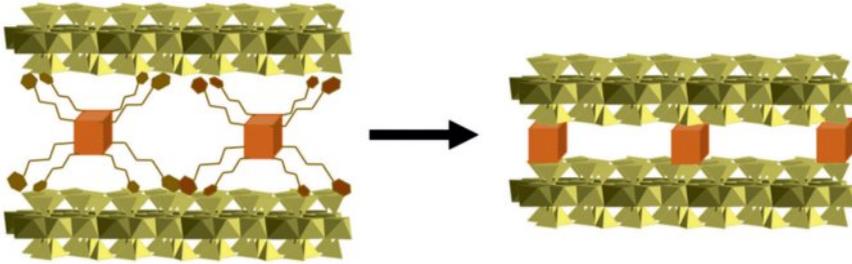


Figura 43. Arcilla intercalada con pilares de $\text{Si}(\text{OR})_4$ y arcilla pilareada con óxidos de silicio resultante de la calcinación a 700 °C.

- **Óxidos de circonio:** la especie de circonio más representativa para formar pilares tiene la fórmula $[\text{Zr}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})_4]^{8+}$ (Figura 44). Dependiendo de las condiciones de preparación de estas especies, puede ocurrir una oligo o polimerización que genera especies de circonio con mayores tamaños. Estas especies, bajo calcinación, se reducen a óxidos de circonio formando nano-aglomerados o clústeres con un carácter ácido muy elevado proporcionando aplicaciones como catalizadores heterogéneos en reacciones que demandan alta acidez y estabilidad térmica suficiente para procesos de refinación de petróleo.

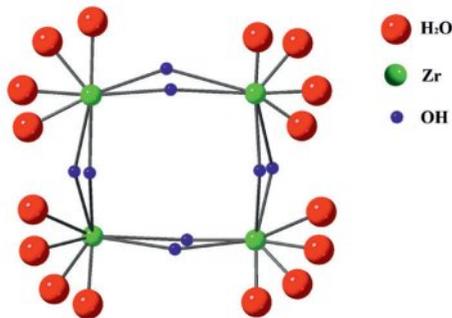


Figura 44. Estructura del agente formador de pilares de circonio.

- **Óxidos de titanio:** normalmente las especies de pilareo de titanio se preparan por reacciones sol-gel con precursores alcóxidos, formando pequeñas partículas de $\text{TiO}_x(\text{OH})_{2x}$ ($x = 1, 2$) con diferentes tamaños que dependen de grado de oligomerización. Al igual que los agentes formadores de pilares anteriores, estos sufren dehidroxilación a altas temperaturas para formar clústeres interlaminares de óxidos de titanio. Las arcillas con estos pilares presentan cerca de 13 Å de espacio interlaminar con áreas específicas de 300 m²/g que son empleadas como catalizadores en reacciones de oxidación.
- **Óxidos de hierro:** las arcillas pilareadas con óxidos de hierro provienen de agentes obtenidos por hidrólisis de acetato de hierro (III) que se transforman en núcleos poliatómicos de óxidos de hierro. Estas arcillas pueden ser utilizadas en reacciones de química fina o química verde.
- **Óxidos mixtos:** algunos investigadores desarrollaron métodos para formar pilares con especies de óxidos mixtos, por ejemplo, pilares de aluminio y galio, teniendo en cuenta que el galio puede formar estructuras de *Keggin*, al igual que el aluminio. Otras arcillas incluyen pilares de óxidos de Al-Cu, Al-Ni, Al-Fe, Si-Ti, además de sistemas que contienen cationes trivalentes de tierras raras como el La y el Ce (Pergher *et al.*, 2005). Una variación de los óxidos mixtos se efectuó por la formación de pilares con dos especies diferentes de precursores, originando una arcilla que contiene pilares independientes de óxidos de aluminio y óxidos de silicio (Fetter *et al.*, 1995).
- **Arcillas:** Debido a la gran capacidad de introducir especies de las más diversas entre las láminas de las arcillas, se logró desarrollar una arcilla intercalada con otra arcilla, es decir, una montmorillonita intercalada con una imogolita (Johnson *et al.*, 1988), que es una arcilla de estructura tubular, como se representa en la Figura 45.

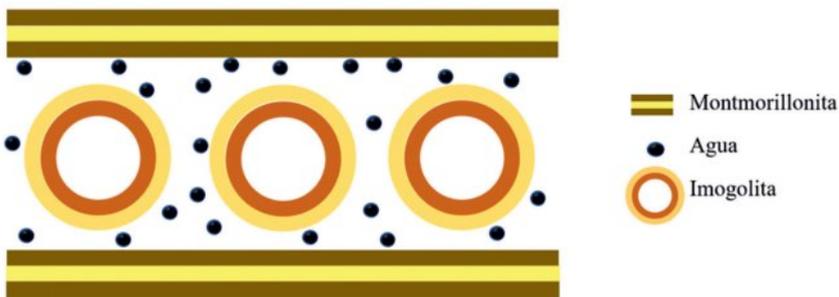


Figura 45. Arcilla montmorillonita con pilares de arcilla imogolita.

La segunda etapa del proceso de pilareo consiste en un intercambio iónico entre los cationes iniciales u originales de la arcilla, por los agentes que formarán los pilares en el espacio interlaminar.

El proceso convencional implica sistemas muy diluidos (0.5 a 2 g de arcilla/litro de solución), tiempos prolongados de hasta 18 h o más, y temperaturas de cerca de los 80 °C. Como se observa, este proceso puede llegar a ser muy complejo y requiere mucho tiempo, además de que requiere enormes equipos para este proceso debido a que se emplean enormes volúmenes de agua, mismos que son necesarios para el proceso de intercalación. Por tanto, todas estas condiciones hacen que el proceso de pilareo no sea aplicable a escala industrial. Esta etapa de intercalación ha sido el centro de atención de muchos científicos que se han dedicado a la reducción en el tiempo y los costes de energía empleada, es decir, buscan formas más rápidas y económicas para que sea un proceso viable y pueda ser usado comercialmente. Una de las alternativas que se han desarrollado para disminuir los tiempos y consumos energéticos, consiste en efectuar el intercambio iónico empleando técnicas avanzadas como la irradiación con ondas electromagnéticas como las microondas o los rayos gamma y ondas mecánicas como los ultrasonidos (Fetter & Bosch, 2010). Así, con estos tratamientos, el tiempo de intercalación se reduce y el uso de agua disminuye hasta en un 50% con las microondas y un 40% con los ultrasonidos. Además, el empleo de estas técnicas permite obtener distribuciones más homogéneas de las especies intercaladas en las galerías de las arcillas (Figura 46) favoreciendo su estabilidad química y térmica.

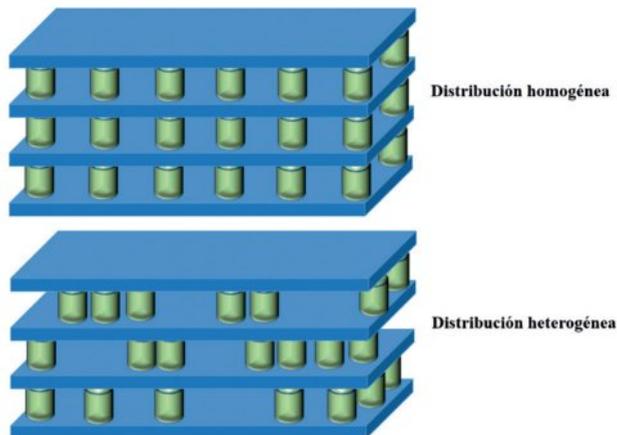


Figura 46. Arcillas con pilares distribuidos homogénea y heterogéneamente.

Con el proceso de intercalación, se generan algunas especies que no se intercalaron, así como cationes que se hayan quedado dispersos; por ello, es necesario que el material pase por un proceso de lavado, que se repite varias veces hasta que los iones cloruros o nitratos se eliminen completamente de los materiales arcillosos sólidos. Para este proceso se requiere el uso de grandes volúmenes de agua por lo que se dificulta el escalado a nivel industrial y los costos se incrementan muchísimo.

Una vez que nuestra arcilla ha sido lavada, se somete a un proceso de secado, el cual, ocurre normalmente a temperaturas entre 70 y 300 °C. En muchas ocasiones y dependiendo del tipo de agente de pilareo, la rampa de temperatura debe de ser muy lenta para evitar los súbitos cambios de estado del agua, que pasa del estado líquido a vapor, lo que puede ocasionar un desplazamiento o rompimiento de los agentes que formarán los pilares.

El proceso final en la formación de pilares en una arcilla consiste en tratar térmicamente los materiales intercalados en temperaturas que van desde los 300 hasta los 800 °C, con tiempos de cerca de 5 horas o más, dependiendo del tipo de arcilla inicial y el agente de intercalación que se haya empleado. Con esta etapa provocamos en la arcilla, la deshidratación y deshidroxilación de los policaiones intercalados, transformándose en grupos de polióxidos metálicos estables. Durante este proceso de calcinación, la unión entre las especies intercaladas y las capas de arcilla pasa de ser de carácter iónico a ser casi un carácter covalente, lo que resulta en la estabilización de la red porosa, formando sólidos rígidos y muy resistentes térmicamente. A este paso también se le denomina activación térmica.

En este proceso, el espacio basal puede disminuir, pero no debería colapsar debido a la calcinación a altas temperaturas. También se sugiere que la especie de intercalación no deba ocupar todo el espacio interlaminar de la arcilla para tener una porosidad accesible con áreas superficiales específicas elevadas en el orden entre 200 y 800 m²/g. Además, si durante el proceso de lavado, no se eliminaron por completo iones como los cloruros o los nitratos, también pueden ser eliminados en esta etapa (Pergher *et al.*, 2005). En la Figura 47 se esquematiza las etapas de síntesis de arcillas pilareadas.

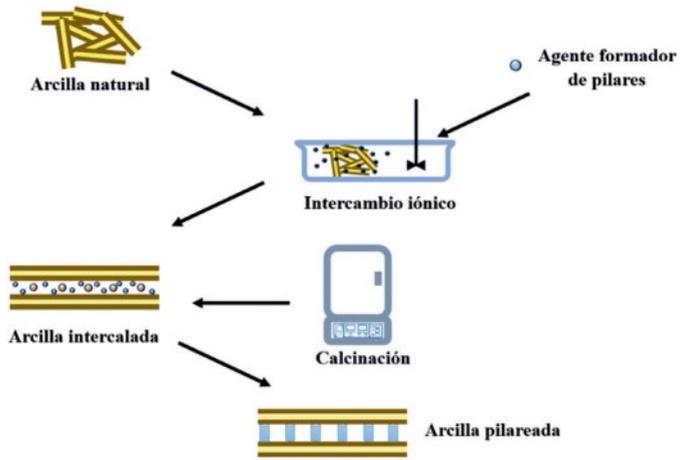


Figura 47. Diagrama de representación de las etapas del proceso de síntesis de arcillas pilareadas.

ARCILLAS ANIÓNICAS

Las arcillas destacadas

La civilización de los mexicas fue una gran sociedad que dominó la mayor parte del territorio mexicano actual; no obstante, otra civilización tomó gran importancia dominando el sureste de México, los Mayas. Esta civilización sobresalió en más de dos milenios en muchísimos aspectos socioculturales. Aspectos tan relevantes como su sistema de escritura, que fue uno de los más desarrollados del continente americano, así también su sistema de numeración fue muy importante. Además, en cuanto a su arte y arquitectura, también fueron grandes desarrollos para su época. Por otro lado, su cosmovisión, mitología y notables avances en la astronomía y las matemáticas, posicionaron a esta cultura como una de las más grandes civilizaciones del México prehispánico.

Es así como, en la época antigua, dos grandes civilizaciones se desarrollaron y a pesar de sus diferencias, de ambas hubo grandes aportes que incluso ahora nos siguen sorprendiendo (Figura 48).



Figura 48. Representación del aporte de ambas culturas (Mayas y mexicas) a la civilización.

De la misma manera que en el México prehispánico se tuvieron dos grandes culturas, es posible dividir a las arcillas en dos grandes grupos, en las que sus propiedades son muy variadas: arcillas catiónicas, las cuales son muy fáciles de encontrar en la naturaleza, y arcillas aniónicas, que son muy escasas en la naturaleza, pero relativamente sencillas y baratas de sintetizar en el laboratorio o a escala industrial. Las grandes diferencias que encontramos en estos grupos radican en

que las arcillas catiónicas presentan capas de silicato de aluminio y cationes en el espacio interlaminar para equilibrar las cargas, mientras que las arcillas aniónicas tienen capas de hidróxidos metálicos cargadas positivamente con aniones que equilibran las cargas laminares.

Hasta este punto solo se ha hablado de las arcillas catiónicas, pero las arcillas aniónicas también son muy importantes dentro de la ciencia de las arcillas. Un claro ejemplo de este tipo de arcillas son las que mejor conocemos como hidrotalcitas o hidrotalquitas que fueron descubiertas por el profesor K. J. A. Theodor Cheerer en Snarum, provincia de Buskerud en Noruega. Su nombre lo recibió en el año de 1842 por Carl Christian Hochstetter y lo atribuyó a la presencia de agua en su estructura y la apariencia blanca similar al talco. La fórmula química que presentó en aquel momento se escribió como $Mg_6A_{12}(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ (Rives, 2001).

Una vez que esta arcilla fue descubierta, se dedujo que es una arcilla muy poco abundante en la naturaleza y que es formada por la meteorización de los basaltos o las precipitaciones en fuentes de agua salada, por lo que estudiarla se complicaba mucho. Una opción que surgió para conocer todas sus bondades fue la de obtenerla sintéticamente, de ahí que recibiera, posteriormente muchos nombres como arcillas aniónicas, hidróxidos dobles laminares o, como materiales o compuestos tipo hidrotalcita, o simplemente hidrotalcitas. Son el único grupo de arcillas que comprenden al grupo de las arcillas aniónicas, lo que las hace muy importantes para diversos campos.

Pertenecen a un gran grupo de materiales que pueden ser naturales y sintéticos que se producen fácilmente cuando se combinan mezclas adecuadas de sales metálicas y una base. Se forman por capas que contienen hidróxidos de dos (a veces más) tipos diferentes de cationes metálicos y que poseen una carga positiva global, que es neutralizada mediante la incorporación de aniones intercambiables. Cuando hablamos de este material, como su nombre lo dice, contienen diversas cantidades de agua unidas a las capas de los grupos hidróxido y/o a los aniones interlaminares. La forma de combinación de los metales en las láminas ocurre coordinadamente, es decir, como cationes metálicos, se coordinan octaédricamente gracias a los grupos hidroxilo. Estos cationes, en la mayoría de los casos, se encuentran en los estados de oxidación 2+ y 3+, pero como en todo, hay algunas excepciones, que pueden tener estados de oxidación de 1+ o 4+ (Braterman *et al.*, 2004).

Como podemos tomar en cuenta, son arcillas que carecen de silicio y que, además, presentan una gran insolubilidad, por lo que se forman comúnmente como partículas con tamaños inferiores a los micrones en condiciones de alta sobresaturación y, por tanto, el control cinético toma mayor relevancia que el control termodinámico en su síntesis. Es así como, para poder sintetizar este tipo de arcillas aniónicas, inicialmente implica la formación de un hidróxido metálico trivalente intermedio, que proporciona numerosos sitios para la heteronucleación. Por ello, las propiedades de las hidrotalcitas, incluido el grado de orden de distribución de los diferentes cationes en las láminas, dependen críticamente del proceso de mezclado durante la síntesis, así como de los detalles del envejecimiento posterior u otro tratamiento, lo que puede dificultar la comparación de los resultados obtenidos. Así, con diversas técnicas de caracterización (como la espectroscopía, microscopía y varios tipos de difracción, entre otras técnicas), proporcionan información acerca del tamaño y la perfección de los cristalitas en diversas escalas de longitud.

La naturaleza de las hidrotalcitas

La ocurrencia de las arcillas en la naturaleza se hace visible por los diversos cambios que puede haber en todo el entorno, para lo que la hidrotalcita no es la excepción. Naturalmente, se puede encontrar como un mineral blanco con un sistema cristalino romboédrico, con una baja dureza de 2 en la escala de Mohrs, una baja densidad de 2.06 g/cm^3 y una fórmula química de $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}(\text{CO}_3)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Aunque se sabe que la disponibilidad de esta arcilla es limitada en la naturaleza, las condiciones para que se forme pueden encontrarse fácilmente en los suelos. La mayoría de los cationes metálicos de la primera serie de transición pueden incorporarse a las láminas de hidroxilo en condiciones geoquímicas. Es por ello por lo que en la naturaleza, se han encontrado hidrotalcitas formadas por NiAl, generadas durante la percolación del suelo con Ni^{2+} en suelos limosos, arenosos y francos. Lo mismo ocurre con la formación de la zincita, una hidrotalcita de ZnAl.

Por otro lado, también en la naturaleza, se ha encontrado a la hidrocalumita, un raro aluminato de calcio con fórmula química $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ que se presenta en forma de cristales laminares en las amplias cavidades de las rocas fonolíticas de Montalto di Castro (Italia) y en inclusiones calcáreas en el basalto

de Bellerberg cerca de Ettringen (Alemania), y de Boisséjour (Francia). Además de que se han encontrado muchos minerales relacionados a este tipo de arcillas (Tabla 12) (Forano *et al.*, 2013).

Tabla 12. Minerales de hidrotalcita y sus fórmulas químicas.

Mineral	Fórmula
Akopovaita	$\text{Al}_4\text{Li}_2(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_3$
Brugnatellita	$\text{Mg}_6\text{Fe}^{3+}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Coalingita	$\text{Mg}_{10}\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{24}[\text{CO}_3]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Cualstibita	$\text{Cu}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Sb}^{5+}(\text{OH})_6]$
Omsita	$\text{Ni}_2\text{Fe}^{3+}(\text{OH})_6[\text{Sb}(\text{OH})_6]$
Zincalstibita	$\text{Zn}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Sb}^{5+}(\text{OH})_6]$
Dritsite	$\text{Li}_3\text{Al}_4(\text{OH})_{12}\text{Cl}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Fougerita	$\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{12}[\text{CO}_3]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Liudongshengita	$\text{Zn}_4\text{Cr}_2(\text{OH})_{12}(\text{CO}_3)\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Mössbauerita	$\text{Fe}^{3+}_6\text{O}_4(\text{OH})_8[\text{CO}_3]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Trébeurdenita	$\text{Fe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_4\text{O}_2(\text{OH})_{10}\text{CO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Carrboydita	$(\text{Ni}_{1-x}\text{Al}_x)(\text{SO}_4)_{x/2}(\text{OH})_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$
Glaucozerinita	$(\text{Zn}_{1-x}\text{Al}_x)(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_{x/2}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
Hydrohonessita	$(\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}^{3+}_x)(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_{x/2}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
Mountkeithita	$[(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}^{3+}_x)(\text{OH})_2][\text{SO}_4]_{x/2}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
Zincaluminita	$\text{Zn}_6\text{Al}_6(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{16}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Hydrocalumita	$\text{Ca}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{12}(\text{Cl}, \text{CO}_3, \text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Kuzelita	$\text{Ca}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{12}[\text{SO}_4]\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Desautelsita	$\text{Mg}_6\text{Mn}^{3+}_2(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Droninoita	$\text{Ni}_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{16}\text{Cl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Hidrotalcita	$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Hidrotalcita-3R	$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Iowaita	$\text{Mg}_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{16}\text{Cl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Meixnerita	$\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Piroaurita	$\text{Mg}_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Reevesita	$\text{Ni}_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{OH})_{16}(\text{CO}_3)\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Stichtita	$\text{Mg}_6\text{Cr}^{3+}_2(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Takovita	$\text{Ni}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
UM1998-10-CO:CoHNi, análoga a la reevesita	$\text{Ni}_6\text{Co}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
UM2002-02-COH:FeNi, análoga a la reevesita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Ni})_6\text{Fe}^{3+}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Woodallita	$Mg_6Cr_2(OH)_{16}Cl_2 \cdot 4H_2O$
Muskoxita	$Mg_7Fe_4O_{13} \cdot 10H_2O$
Caresita	$Fe^{2+}_4Al_2(OH)_{12}[CO_3] \cdot 3H_2O$
Charmarita	$Mn^{2+}_4Al_2(OH)_{12}[CO_3] \cdot 3H_2O$
Clormagaluminita	$Mg_4Al_2(OH)_{12}Cl_2 \cdot 3H_2O$
Comblainita	$Ni_4Co_2(OH)_{12}[CO_3] \cdot 3H_2O$
Quintinita	$Mg_4Al_2(OH)_{12}(CO_3) \cdot 3H_2O$
Zaccagnaite	$Zn_4Al_2(OH)_{12}[CO_3] \cdot 3H_2O$
UM1987-05-OH:AlCMg, similar a la quintinita	$Mg_4Al_2(OH)_{12}(CO_3,SO_4) \cdot 3H_2O$
Erssonita	$CaMg_7Fe^{3+}_2(OH)_{18}(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Karchevskiyta	$Mg_{18}Al_9(OH)_{54}Sr_2(CO_3)_9(H_2O)_6(H_3O)_5$
Motukoreaita	$Mg_6Al_3(OH)_{18}[Na(H_2O)_6][SO_4]_2 \cdot 6H_2O$
Natroglaucocerinita	$Zn_6Al_3(OH)_{18}[Na(H_2O)_6](SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Nikischerita	$Fe^{2+}_6Al_3(OH)_{18}[Na(H_2O)_6](SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Shigaita	$Mn_6Al_3(OH)_{18}[Na(H_2O)_6](SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Wermlandita	$Mg_7Al_2(OH)_{18}[Ca(H_2O)_6][SO_4]_2 \cdot 6H_2O$
Honessita	$(Ni_{1-x}Fe^{3+}_x)(OH)_2[SO_4]_{x/2} \cdot nH_2O$
Woodwardita	$Cu_{1-x}Al_x(OH)_2(SO_4)_{x/2} \cdot nH_2O$
Zincowoodwardita	$Zn_{1-x}Al_x(OH)_2[SO_4]_{x/2} \cdot nH_2O$

El esqueleto de una hidrotalcita

Los avances en las ciencias han permitido desarrollar diversos materiales que son tan útiles para la sociedad como para la industria; las hidrotalcitas son una clase versátil y emergente de materiales laminares de dos dimensiones.

La estructura de las hidrotalcitas se basa en unidades octaédricas de metales trivalentes ($3+$), $M(OH)_6$, los cuales, comparten bordes para construir capas de tipo brucita con metales divalentes ($2+$), $M(OH)_2$. Por tanto, estas unidades octaédricas, que forman láminas, van a contener cationes metálicos tanto divalentes como trivalentes y, por ende, están cargadas positivamente, siendo la densidad de carga proporcional a la relación de metales trivalentes de $x = M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$. Dichas unidades pasan a apilarse formando capas en las que, especies aniónicas se intercalan en el espacio generado en cada capa para proporcionar un equilibrio de carga, además de integrar moléculas de agua (Rives, 2001).

Por tanto, con estos detalles, la fórmula general de este tipo de arcillas se escribe como $[M^{2+}_{(1-x)}M^{3+}_x(OH)_2](X^{m-})_{(x/m)} \cdot nH_2O$, donde M^{2+} y M^{3+} son catio-

nes divalentes y trivalentes, la x representa la relación metálica molar de $M^{3+}/(M^{3+}+M^{2+})$, y n es el número de moléculas de agua. Su estructura se representa en la Figura 49.

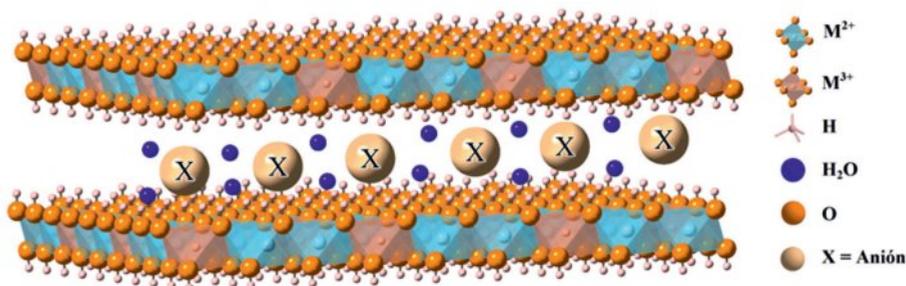


Figura 49. Estructura de una hidrotalcita.

Con base en esto, se podría pensar que los metales divalentes y trivalente pueden ser cualquiera de la tabla periódica, pero no es así, deben cumplir con determinadas condiciones para que formen parte de la estructura de una hidrotalcita. Lo más frecuente que se puede encontrar en relación con los cationes metálicos divalentes es que deben presentar su radio iónico similar, para ello los metales divalentes deben presentar radios iónicos que varían entre 65 y 80 pm, como el Mg y el Mn, mientras que los radios de los iones metálicos trivalentes deben de estar entre 50 y 69 pm como el Al y el Cr. Los cationes divalentes que más frecuentemente forman la estructura de la hidrotalcita son: Fe^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} o Cu^{2+} y como ejemplos de cationes trivalentes se tiene al Al^{3+} , Fe^{3+} o Ga^{3+} (Tabla 13) (Braterman *et al.*, 2004), pero eso no es todo, se pueden encontrar cationes de diversas valencias y algo inusuales que pueden formar una hidrotalcita, como el Ti^{4+} , Li^+ , La^{2+} , Ce^{2+} , uranilo (UO_2^{2+}), Zr^{2+} , Ru^{3+} , Rh^{2+} y Sn^{2+} , entre otros.

Tabla 13. Cationes que pueden formar hidrotalcitas.

M^{2+}	Radio (nm)	M^{3+}	Radio (nm)	M^{4+}	Radio (nm)	M^+	Radio (nm)
Fe	0.061	Al	0.054	V	0.058	Li	0.076
Co	0.065	Co	0.055	Ti	0.061	Na	0.102
Ni	0.069	Fe	0.055	Sn	0.069		
Mg	0.072	Mn	0.058	Zr	0.072		
Cu	0.073	Ga	0.062				

Zn	0.074	Rh	0.067
Mn	0.083	Ru	0.068
Pd	0.086	Cr	0.069
Ti	0.086	V	0.074
Cd	0.095	In	0.080
Ca	0.100	Y	0.090
		La	0.103

Así, se tienen muchas combinaciones de cationes, de las cuales algunas de ellas se presentan en la Tabla 14 (Forano *et al.*, 2013). Además, tampoco hay que limitarse a un sistema binario de cationes divalentes y trivalentes, sino que también se han reportado la síntesis de hidrotalcitas con 3 o 4 cationes diferentes en las láminas. Pero, a pesar de que hay muchos cationes, se debe controlar una relación metálica molar entre ellos, por lo que, el rango común de M^{2+}/M^{3+} se encuentra entre 2 y 4 (o $0.2 < x < 0.33$) (Theiss *et al.*, 2016), pero, actualmente, se ha reportado que puede estar alejado de estos valores, es decir, de entre 1 y 10.

Tabla 14. Combinaciones posibles de cationes para formar hidrotalcitas.

M^{2+}/M^{3+}	Al	Ga	Sc	Cr	Mn	Fe	Co
Mg	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x			x	x
Mn	x						
Fe	x					x	
Co	x	x		x		x	x
Ni	x	x		x	x	x	x
Cu	x			x		x	
Zn	x	x		x		x	x

Referente a los aniones que pueden ubicarse entre las láminas de las hidrotalcitas, se pueden encontrar especies de diversos tamaños, lo que le confiere características importantes al espacio interlaminaar y a todo el sólido. Los enlaces que se producen entre los aniones o moléculas interlaminaares y las láminas de la hidrotalcita son débiles. Por ello, dos procesos importantes pueden ocurrir para la incorporación de estos aniones dentro de la estructura del material; uno de

ellos es que pueden situarse entre las capas durante la formación de la estructura laminar, y el segundo es a través de un intercambio aniónico posterior. Estos procesos, permiten que el espacio entre las láminas puede llegar a ser muy grande, cerca de los 30 Å o más, en donde pueda alojarse una molécula de ADN o una enzima.

De la gran variedad de aniones que se pueden tener, solo algunos se enlistan a continuación (Rives, 2001):

- Haluros: fluoruro, cloruro o el yoduro
- Oxo-aniones: carbonato, nitrato, sulfato, cromato, tungstato, hidroxilo
- Oxo y polioxometalatos: hexamolibidato, decavanadato
- Complejos aniónicos: ferro y ferricianuro, complejos organometálicos
- Aniones orgánicos: carboxilatos, fosfonatos, sulfatos de alquilo

Se ha reportado un orden de preferencia para los aniones más comunes que se depositan entre las láminas (Miyata, 1983):

- Para los aniones monovalentes: $\text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$
- Para los aniones divalentes: $\text{CO}_3^{2-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{WO}_4^{2-}$

Construyendo una hidrotalcita

Como se observa, estos materiales presentan muchas variables que permiten la modificación de cada aspecto dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar, por lo que, como se mencionó anteriormente, el proceso de síntesis le conferirá diversas propiedades, es así como existen diferentes métodos de preparación o síntesis de hidrotalcitas, mismos que se pueden clasificar en: métodos de coprecipitación, sol-gel, sal-óxido, hidrotérmico, hidrólisis de urea, deposición electroquímica, crecimiento in situ de películas delgadas y otros métodos.

Se inicia con el método de coprecipitación (Figura 50), el cual se emplea para obtener el material sólido. Consiste en añadir un agente precipitante a disoluciones acuosas de los componentes deseados. Se lee muy sencillo, pero tiene dos posibles distinciones:

- Coprecipitación a pH constante: es el más utilizado en la preparación de hidrotalcitas y consiste en controlar el pH, manteniéndolo constante durante el proceso

de coprecipitación, el cual puede variar entre 7 y 14, pero se ha reportado que puede estar en un pH más bajo, dependiendo del catión que vaya a formar la estructura del material (Kloprogge *et al.*, 2004).

- Coprecipitación a pH variable o coprecipitación a alta saturación: por este método se obtienen materiales menos cristalinos que los obtenidos a pH constante. En este método no se controla el pH.



Figura 50. Método de síntesis de hidrotalcitas por coprecipitación.

Otro método para obtener una hidrotalcita es por el método sol-gel (Figura 51), el cual consiste en la formación de redes o cadenas de átomos que se forman por la dispersión de alcóxidos metálicos que contengan los metales divalentes y trivalentes (Al^{3+} y Mg^{2+} por ejemplo) en un líquido, para formar una fase, en la cual se tendrá un líquido disperso en un sólido (gel) al que se le somete a un tratamiento térmico, obteniendo compuestos cristalinos con mayores áreas específicas que los obtenidos por el método convencional de coprecipitación.

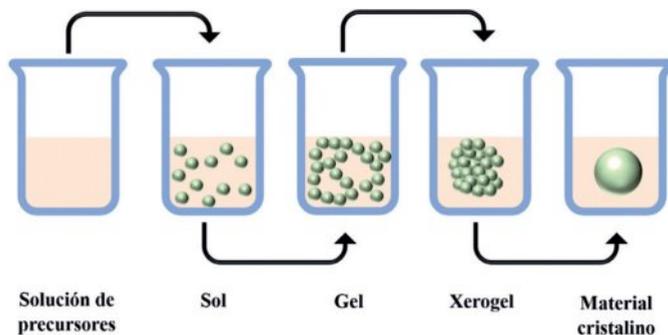


Figura 51. Procedimiento de síntesis de hidrotalcitas por el método sol-gel.

El método de sal-óxido consiste en la reacción entre una suspensión del óxido metálico divalente con una solución salina formada por el catión trivalente y el anión a intercalar. El procedimiento se basa en añadir cantidades constantes de la solución de metal trivalente sobre la suspensión del óxido de metal divalente, esperando un tiempo determinado entre la adición de una alícuota y otra, hasta que el pH se mantenga constante (Crepaldi & Valim, 1998).

La síntesis por el método hidrotérmico consta de emplear los cationes elegidos para formar a la hidrotalcita en forma de óxido, los cuales son suspendidos en agua y se le añade una solución de ácido, cuya base conjugada se intercala previamente. En algunos casos, se utiliza el anhídrido ácido (CO_2 , NO_2) en lugar de una solución ácida. Esta reacción siempre se realiza a altas temperaturas y presiones.

Para obtener una hidrotalcita por el método de hidrólisis de urea, una solución acuosa de los cationes metálicos seleccionados y la urea en la proporción molar estequiométrica se calientan en el rango de temperatura de 100 °C hasta la temperatura de reflujo durante dos o tres días. Al final del proceso, la urea se hidroliza a carbonato de amonio que conduce a la precipitación de la hidrotalcita con el ion carbonato como anión intercalado. Este método de precipitación homogénea mediante la hidrólisis de la urea ofrece hidrotalcita con una alta cristalinidad y una estrecha distribución del tamaño de las partículas (Saju & Sabu, 2020). Además, existe una variación de este método, donde se precipitan las sales normalmente, pero se utiliza un retardante de base, urea, como agente precipitante, en el que el paso de nucleación puede separarse del crecimiento de la partícula, y el envejecimiento se evita desde el principio. Este método se lleva en dos pasos: formación de cianato de amonio como paso determinante de la velocidad y la rápida hidrólisis del cianato en carbonato de amonio (Forano *et al.*, 2013).

Por deposición electroquímica los iones de nitrato se reducen eléctricamente a iones de hidróxido en el electrodo de trabajo, por lo que aumenta el valor local del pH que induce la precipitación de las películas de hidrotalcita. Este es un buen método para depositar películas de cualquier grosor, morfología y densidad de película que se desee sobre un sustrato metálico con buena adherencia (Richetta *et al.*, 2017).

Para el crecimiento *in-situ* de películas de hidrotalcita, el sustrato se sumerge en una solución acuosa de otra sal metálica y se añade una base para controlar el pH. En este caso, el sustrato desempeña un doble papel, como fuente de uno de

los iones metálicos que reaccionan y actuar como superficie para la deposición de la película (Richetta *et al.*, 2017).

Otros métodos que se han propuesto para la síntesis de hidrotalcitas incluyen la síntesis a partir de desechos industriales (Galindo *et al.*, 2015), por ablación con láser pulsado (Hur *et al.*, 2010) o por la alteración de vidrios basálticos (Abdelouas, 1994).

Después de sintetizar las hidrotalcitas, se pueden emplear métodos hidrotérmicos que permiten controlar las propiedades texturales y estructurales. Este proceso generalmente es empleado después de utilizar el método de coprecipitación, pero no es necesario. Estos métodos pueden ser: hidrotérmico convencional, por microondas, por ultrasonido y por un método simultáneo de ultrasonido-microondas. Con estos métodos se puede incrementar la cristalinidad, como es el caso del ultrasonido, mientras que con el uso de las microondas incrementa la velocidad de crecimiento de los cristales, así como el área superficial específica y la porosidad. El método simultáneo de microondas-ultrasonido combina las propiedades generadas por ambos métodos. El método hidrotérmico convencional incrementa la cristalinidad y el tamaño de cristal, pero empleando largos periodos de tiempo y altas temperaturas (Forano *et al.*, 2013).

Cada método en particular genera materiales con diferentes características texturales y estructurales únicas, pero existen métodos que se emplean después de obtener el material, principalmente para intercalar un anión deseado entre las láminas de la hidrotalcita (Figura 52). Estos métodos son:

- El método de intercambio aniónico es un método indirecto de obtención de la hidrotalcita, debido a que consiste en emplear una hidrotalcita ya preparada previamente suspendida, en la cual se agrega un exceso de la sal del anión a intercalar y se agita por determinado tiempo. Este método es excelente para producir materiales con aniones deseados, por lo que algunos autores llegan a llamar a los materiales obtenidos como hidrotalcitas pilareadas o intercaladas.
- El método de reconstrucción de la estructura consiste en, como su nombre lo dice, reconstruir la estructura de la hidrotalcita, esto es, cuando una hidrotalcita es calcinada entre 400 y 600 °C, genera lo que se conoce como óxidos mixtos, los cuales, tiene una propiedad muy interesante cuando son originados a partir de una hidrotalcita, propiedad que se conoce como “efecto memoria”. Efectivamente, estos materiales no olvidan su estructura original, la cual, si se dispersan

los óxidos en una solución con las sales de los aniones deseados (u originales) y se agitan por un tiempo determinado, se puede volver a generar la estructura de la hidrotalcita (Saju & Sabu, 2020). Debido a que es un proceso donde se depositan aniones dentro de la estructura, es necesario que este proceso se realice en una atmósfera inerte (normalmente de N_2) para evitar la interferencia del aire y que genere la intercalación de aniones carbonato, los cuales pueden llegar a ser un dolor de cabeza, si es que no se desean en la estructura.

- Exfoliación: este método se refiere a una estructura en la que las láminas individuales de arcilla se encuentran dispersas sin aniones.
- Otras modificaciones que se pueden realizar cuando la hidrotalcita ya ha sido sintetizada son los injertos (*grafting*) y las funcionalizaciones. Generalmente, el proceso de injertado se realiza con aniones en el espacio interlaminar para estabilizarlos con la finalidad de que ya no puedan ser intercambiados por otros aniones (Costantino *et al.*, 1997). También se ha realizado la silanización de la superficie de la hidrotalcita, es decir, se adhieren grupos silano (SiH_4) a la superficie laminar (J. Wang *et al.*, 2012).

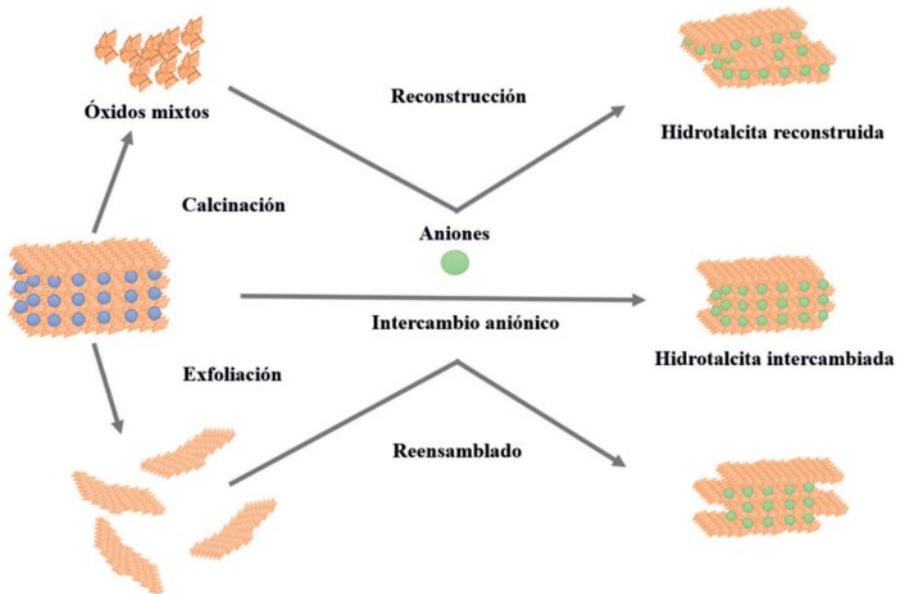


Figura 52. Métodos y materiales resultantes de la modificación de hidrotalcitas.

Propiedades de las hidrotalcitas

Las arcillas aniónicas son únicas en su tipo, debido a que ofrecen diversas propiedades fisicoquímicas que las convierten en materiales idóneos para múltiples aplicaciones. Además, son los únicos materiales porosos con propiedades básicas.

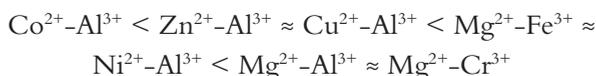
La forma de sus partículas es una característica importante. Se ha descrito que pueden obtenerse materiales en forma microporosa ordenada en carácter tridimensional, es decir, en forma de panal de abeja (Géraud *et al.*, 2006). También se han obtenido materiales en forma esférica (Li *et al.*, 2014), como nanopartículas (Michalik *et al.*, 2020) y como coloides (Lagaly *et al.*, 2001), además de los ya descritos en capa fina.

La estabilidad química es una importante propiedad que presentan estos materiales, la cual depende de los cationes que presente en sus láminas, acorde al producto de su solubilidad (K_{ps}) incrementando de acuerdo al siguiente orden (Forano *et al.*, 2013):



Esta solubilidad también tiene una influencia de los aniones que se ubican en el espacio interlaminar. Así, el silicato y el borato disminuyen la solubilidad, mientras que el nitrato y el sulfato la aumentan, tomando de comparativa los aniones carbonato.

Referente a la estabilidad térmica, las hidrotalcitas son materiales que, cuando se calcinan, generan óxidos mixtos con grandes aplicaciones dentro de la catálisis, con la cual, de la misma manera que la solubilidad depende de los cationes que se encuentren presentes en sus láminas, incrementando en el siguiente orden:



Además, las hidrotalcitas multicomponentes, es decir, con más de dos cationes, presentan sus propias fases de óxido distintivas durante la descomposición térmica (Tichit *et al.*, 2001).

Por otro lado, la superficie de la hidrotalcita, la cual contiene cargas positivas, afecta el proceso de dispersión/segregación. También, los valores del potencial zeta (atracción-repulsión entre partículas) son de 40 mV aproximadamente,

mientras que el punto isoeléctrico corresponde a un valor de pH de 11 o 12 en algunos casos (Forano *et al.*, 2013).

Aplicando hidrotalcitas

Estos materiales son interesantes como catalizadores, precursores y soportes de catalizadores en diversas reacciones, como la producción de biodiesel (Benedicto *et al.*, 2018) o la síntesis de compuestos de interés terapéutico (Velázquez-Herrera *et al.*, 2020a).

Además, son precursores de cerámicas, dado que son producto de la meteorización de las rocas. Por tanto, tiene un especial interés como trampas para contaminantes aniónicos como son la adsorción de metales pesados como el Cr (Pérez *et al.*, 2015) o As (Dias & Fontes, 2020), incluidos algunos tipos de residuos radioactivos (Bo *et al.*, 2016), residuos farmacéuticos (Santamaría *et al.*, 2020) o colorantes orgánicos, generados por la industria textil y desechados en las aguas residuales (Garzón-Pérez *et al.*, 2020). También son buenos adsorbentes de gases tóxicos liberados a la atmósfera por los automóviles y las industrias (Yu *et al.*, 2006), debido a su gran área específica, porosidad, alta intercambiabilidad aniónica y baja o nula toxicidad.

Son materiales que se han empleado como aditivos para polímeros, siendo esta una aplicación comercial, ya que aprovecha la capacidad de estos materiales para neutralizar la gran cantidad de residuos aniónicos, como las grandes cantidades de ácido generadas, por ejemplo, en el calentamiento o la degradación del cloruro de polivinilo (PVC) (Korkusuz & Tüzüm Demir, 2020), y como aditivos que funcionan como retardantes de flama para, por ejemplo, su empleo como carga de pinturas intumescentes (contra el fuego) (Han *et al.*, 2015).

Otra cualidad que presentan estos materiales es que pueden actuar como excelentes fotocatalizadores y electrocatalizadores aplicables en el proceso de rompimiento de moléculas de agua, para separar el hidrógeno del oxígeno (Rao *et al.*, 2016). Así, permite la obtención de hidrógeno para la producción de energía, la cual, se ha vuelto una tecnología que es cada vez más utilizada para resolver la crisis energética de la época actual, ofreciendo una producción de bajo coste y alta eficiencia, además de que es amigable con el medio ambiente.

Las hidrotalcitas ofrecen también las características sobresalientes para fabricar electrodos de pseudocondensadores, debido a la presencia de superficies

electroquímicamente activas, su naturaleza y bajo costo. En otras palabras, las hidrotalcitas pueden ser fabricadas para que contengan metales de transición, los cuales, presentan una gran capacidad específica en electrolitos alcalinos acuosos.

Las hidrotalcitas son materiales con características peculiares, pero las que han tomado mayor importancia en la actualidad son su buena biocompatibilidad y la baja toxicidad que presentan, por lo que han recibido mucha atención por parte de los investigadores en el campo biomédico, logrando así, aplicaciones innovadoras, como la administración de fármacos, genes, materiales para la biodetección de moléculas en el cuerpo, y la producción de compuestos farmacéuticos (Jin *et al.*, 2020). Además, sus grandes capacidades para intercambiar aniones han permitido que estos materiales sean intercambiados, en el espacio interlamilar, con diversos fármacos, ácidos nucleicos como el ADN y el ARN, enzimas, entre otros, mismas que son programadas con la finalidad de liberarse de forma controlada y sostenida en un pH determinado, o en diversas condiciones, tomando en cuenta que pueden ser aplicadas por vía oral o directamente sobre el órgano que se requiere atender. Se pueden formular como materiales en micro y nanoescala, posicionándolos en un lugar privilegiado en la industria farmacéutica, que poco a poco se han abierto camino. Si se considera la infinidad de compuestos farmacéuticos que podemos intercalar en estos materiales, podemos mencionar solo algunos como lo son los antiinflamatorios no esteroideos, los antidiabéticos cardiovasculares, antibióticos, anticancerígenos, antioxidantes, antimicrobianos, entre otros (Djebbi *et al.*, 2016).

De manera contraria al beneficio de la liberación de fármacos, tenemos que, estos materiales también han obtenido una relevancia importante en el control de microorganismos, debido a su capacidad de ser agentes biocidas actuando contra bacterias patógenas que son muy resistentes como la *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina, además de inhibir la proliferación de hongos (Lobo-Sánchez *et al.*, 2018; Velázquez-Herrera *et al.*, 2018). Por otro lado, no solo son capaces de eliminar bacterias y hongos, también son capaces de mantenerlos vivos y funcionar como almacenadores y liberadores controlados de bacterias, de las cuales, las bacterias fijadoras de nitrógeno (bacterias que directamente en el suelo, producen fertilizantes a partir del nitrógeno presente en el aire) son las ideales para ser usadas en los cultivos. Estos biomateriales ostentan un gran potencial de aplicación como biofertilizantes (Velázquez-Herrera *et al.*, 2021). Las grandes ventajas que se han desarrollado con el uso de estos materiales

permiten atender las necesidades de sustentabilidad y amigabilidad con el ambiente, funcionan como biomateriales que, en este caso pueden ser usados en la recuperación de tierras desgastadas o en la remediación de suelos.

La hidrotalcita en el mundo nano

Para las antiguas culturas, el establecimiento de sus ciudades jugó un rol importante, ya sea en la edificación de las estructuras o en la decoración de éstas, para ello contaban con los materiales que se encontraban a su alrededor, uno de ellos, que conocemos como “cal”, fue la materia prima que les permitió cumplir con este objetivo.

Algunos textos antiguos presentan la manera de preparar la cal (óxido de calcio), de acuerdo con los escritos de Sahagún se tiene (González Hurtado, 2020).

“El que trata en cal, quiebra la piedra de que hace la cal y la cuece, y después la mata; y para cocerla, o hacerla viva junta primero toda la piedra que es buena para hacer cal; y métela después en el horno, donde la quema con harta leña, y después que la tiene cocida o quemada, mácala para aumentarla. Este tal tratante unas veces vende la cal viva, y otras veces muerta, y la cal que es buena sácala de la piedra que se llama cacalótetl quemada, o de la piedra que se llama tepélatl”.

Los mayas, dentro de los grandes desarrollos que efectuaron, empleaban este tipo de materiales para sus construcciones, las cuales, hasta nuestros días aún se conservan. Las bondades de este material han permitido que sus trabajos se mantengan sin deteriorarse, deriva del proceso de extracción y tratamiento que se le daba, el cual consistía en apagar la cal.

Para apagar la cal, es necesario un proceso de hidratación que transforma su estado de cal “viva”, a cal “muerta” o “apagada” con la finalidad de que esta pueda ser utilizada en la elaboración de mezclas y pinturas. Este proceso se realiza depositándola en un recipiente y se agrega un volumen de agua hasta cubrir la piedra, incorporando el agua lentamente para evitar algún tipo de accidente y agitándola lentamente para dispersar bien la cal, incorporando agua hasta llegar a un nivel que duplique el inicial formando la cal apagada o hidróxido de calcio. Esta dispersión se deja reposar durante días y se emplea para morteros, inyecciones, aplanados o pinturas. A lo largo de este proceso se debe verificar que la superficie no quede seca ni agrietada, manteniendo una capa ligera de agua. De manera general se

recomienda que la cal pueda ser usada después de seis meses, es decir, cuanto más tiempo se deje reposar, mejor comportamiento tendrá para su empleo en aplana-dos, argamasas o morteros, debido a que se carbonata (Cuan Rojas *et al.*, 2020).

Este proceso, que parece sencillo, genera pequeñas partículas de hidróxido de calcio, lo cual, se conoce en nuestros tiempos como nanopartículas. Es conocido que al pasar el tiempo de reposo (hasta 10 años) las partículas se habrán vuelto muy pequeñas y son muy útiles para el proceso de pintado en murales que se empleaban en la época prehispánica. Este fue el primer acercamiento de nuestros antepasados con la tecnología nano.

A medida que ha evolucionado la humanidad, se ha requerido que desarrol-len nuevos materiales que permitan aplicaciones más específicas a la tecnología actual, como lo son los nanomateriales. Una de las ventajas de los materiales nanométricos reside en que la superficie es muy grande en relación con los ma-teriales de tamaño convencional. Así, la relación superficie/masa del material es muy grande y su actividad resulta en un incremento significativo. En este sentido, la obtención de hidrotalcitas en la escala nanométrica se ve fundamentada por el incremento en su actividad, factor importante para su empleo en el área de la catálisis, adsorción o en medicina, sin olvidar su aplicación en nanotecnología.

Los métodos para la obtención de nano-hidrotalcitas en su forma pura y es-table son complicados y requieren muchas condiciones fisicoquímicas para que se conserven en esa forma. Una de las estrategias más útiles para lograr esta con-dición consiste en la combinación de la arcilla con otros materiales para formar materiales compuestos o mejor conocidos como compósitos, en los que el creci-miento de los cristales de hidrotalcita se ve impedido de forma significativa por la interacción con el material matriz (soporte). Por tanto, se genera la dispersión de nano-cristales de hidrotalcita sobre el soporte, como se representa en la Figura 53.

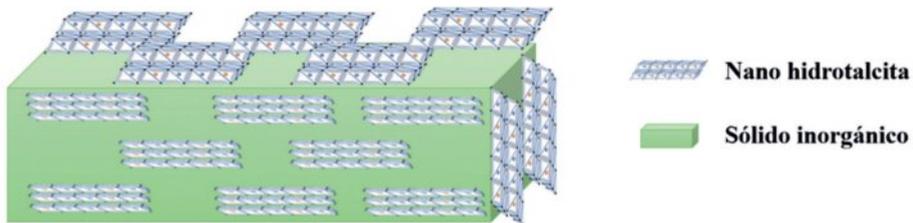


Figura 53. Material compuesto conformado por nano-cristales de hidrotalcita dispersos en un sólido inorgánico.

De entre los métodos para formar compósitos, el más usual consiste en sintetizar la hidrotalcita en presencia de una dispersión acuosa de un material inorgánico que funja como matriz. De este modo, se forman nanocristales de hidrotalcita que se adhieren al material huésped de manera estable, pero esta adhesión depende de varios factores como lo son el tipo de hidrotalcita (composición química), pH del sistema de síntesis y el tratamiento térmico de cristalización. Por tanto, es necesario escoger bien los materiales que se emplearán como soportes de una hidrotalcita, ya que no todos son elegibles para esta función.

Formando vínculos con la hidrotalcitas

Cuando vamos a mejorar las características de un material es necesario que potencialicemos las propiedades fisicoquímicas de este. Para tal efecto, la opción que se ha mencionado, combinar dos materiales para formar un compósito resulta ser muy eficaz. Así, para mejorar las propiedades fisicoquímicas de una hidrotalcita se puede emplear diversos materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, pero un caso especial surge con los materiales inorgánicos, ya que básicamente cualquier material inorgánico puede ser el receptor de nano-hidrotalcitas, pero unos resultan más efectivos que otros, dependiendo de la aplicación que queramos darle.

De entre toda la gama de materiales inorgánicos que se conoce, solo un grupo selecto de materiales ha sido protagonista para unirse a una hidrotalcita y mejorar sus propiedades fisicoquímicas. Estos materiales incluyen a algunos minerales y arcillas como las zeolitas, la montmorillonita, hidroxiapatita, magnetita, halloysita, sepiolita, palygorskita, vermiculita, laponita y la caolinita. Además, se pueden encontrar algunos compuestos y sales metálicas que también se han empleado, como la alúmina, la titanía y, sales de carbonatos y nitratos de potasio. Por último, pero no menos importante, se encuentran los compuestos de silicio, que en la actualidad son una parte importante para el desarrollo de tecnologías modernas, no por nada se le conoce a esta época como la era del silicio, en donde se encuentran compuestos como la sílice amorfa y la SBA-15 que han servido para formar nanopartículas de hidrotalcita.

Muchos beneficios se pueden obtener de la combinación de una hidrotalcita con algún material inorgánico, de los cuales, se puede mencionar que unirla con alguna zeolita, una arcilla o con una sílice, se obtienen materiales que son ami-

gables con el ambiente, es decir no alterarían nuestro ambiente, lo cual, actualmente es el objetivo para el desarrollo de la química verde, en donde se pueden aplicar estos compósitos como catalizadores en la obtención de compuestos de interés terapéutico (Velázquez-Herrera *et al.*, 2020b), en procesos de descontaminación ambiental (Pérez *et al.*, 2015), o simplemente para la fabricación de materiales semiconductores para su uso en la electrónica o la retención de energía (Carvalho *et al.*, 2019). Por otro lado, si el objetivo es el control de diversos microorganismos, podemos cambiar la composición de la hidrotalcita y agregarle metales oligodinámicos (metales capaces de eliminar microorganismos) que servirán para que el compósito se forme con propiedades biocidas que puedan emplearse, si se combinan con una hidroxiapatita, en implantes de prótesis óseas, siendo eficientes en la prevención de enfermedades bacterianas postoperatorias (Segura-Pérez *et al.*, 2020), Figura 54.

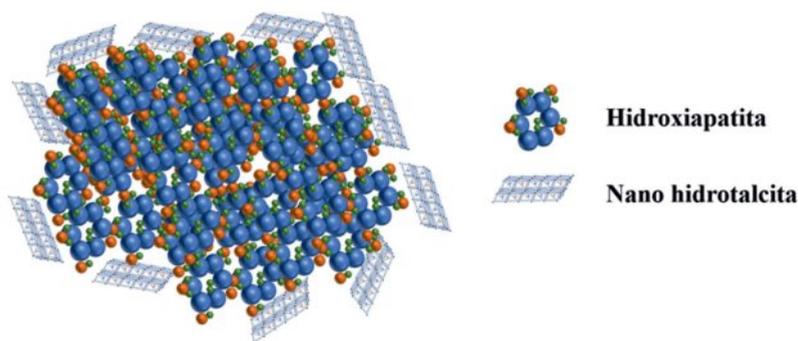


Figura 54. Compósito formado por hidroxiapatita con hidrotalcita para implantes óseos.

Las nano-hidrotalcitas, un futuro por descubrir

Hay que destacar que la obtención de nano-hidrotalcitas es muy reciente, menos de una década que se han comenzado a estudiar y, por tanto, han sido necesarios muchos conocimientos para poder obtener este tipo de materiales a escala nanométrica. Aún, con los recientes avances en este ramo, los científicos adoptan diversas posturas para su obtención, siendo la más acertada la de formar coloides con solvente, no obstante, también se ha referido al empleo de materiales que funjan como matrices para que la hidrotalcita se pueda dispersar y así formar

nanomateriales, pero aun así, el camino de su desarrollo sigue teniendo muchísimas complicaciones, como la falta de profundización en la investigación de sus propiedades fisicoquímicas para el visado hacia nuevas y mejores aplicaciones de estos nobles nanomateriales que, obviamente, tendrán éxitos garantizados debido a su grandiosa versatilidad.

EPÍLOGO

Cuando el ciclo de la arcilla ha pasado por su formación, moldeo y por su aplicación, solo queda una cosa que puede hacer: transformarse nuevamente en ese polvo que la ha originado, regresando a la tierra que la vio formarse, pero siempre estará presente en nuestro entorno, e incluso, se podrá llevar a conocer nuevos mundos, fuera de nuestro pequeño planeta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelouas, A. (1994). *Formation of hydrotalcite-like compounds during R7T7 nuclear waste glass and basaltic glass alteration*. *Clays and Clay Minerals*, 42(5), 526-533. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1994.0420503>
- Baloyi, J., Ntho, T., & Moma, J. (2018). *Synthesis and application of pillared clay heterogeneous catalysts for wastewater treatment: a review*. *RSC Advances*, 8(10), 5197-5211. <https://doi.org/10.1039/C7RA12924F>
- Benedictto, G. P., Sotelo, R. M., Dalla Costa, B. O., Fetter, G., & Basaldella, E. I. (2018). *Potassium-containing hydroxylated hydrotalcite as efficient catalyst for the transesterification of sunflower oil*. *Journal of Materials Science*, 53(18), 12828-12836. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2581-0>
- Bensoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos* (1st ed.). IICA / Serie de libros y materiales educativos.
- Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). *Handbook of Clay Science*. In *Developments in Clay Science* (Vol. 1, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01039-1](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01039-1)
- Bo, A., Sarina, S., Liu, H., Zheng, Z., Xiao, Q., Gu, Y., Ayoko, G. A., & Zhu, H. (2016). *Efficient removal of cationic and anionic radioactive pollutants from water using hydrotalcite-based getters*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(25), 16503-16510. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b04632>
- Braterman, P. S., Xu, Z. P., & Yarberrry, F. (2004). *Layered double hydroxides (LDHs)*. In S. M. Auerbach, K. A. Carrado, & P. K. Dutta (Eds.), *Handbook of Layered Materials* (1st ed., p. 95). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203021354>
- Cano Marín, M. (2018). *Interpretación escultórica: Mitos de la creación* [Universitat Politècnica de València]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131110/Cano - Interpretación escultórica: mitos de la creación.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131110/Cano-Interpretación%20escultórica%3A%20mitos%20de%20la%20creación.pdf?sequence=1)
- Carvalho, S., Santana, T., Matos, C., Costa, L., Sussuchi, E., & Gimenez, I. (2019). *Synthesis of hydrotalcite-supported CdTe semiconductor nanocrystals for electrochemical detection of ciprofloxacin*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190021>
- Cheng, H., Zhou, Y., & Liu, Q. (2019a). *Kaolinite nanomaterials: preparation, properties and functional applications*. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 285-334). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00006-5>
- Cheng, H., Zhou, Y., & Liu, Q. (2019b). *Kaolinite nanomaterials: preparation, properties and functional applications*. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 285-334). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00006-5>
- Cool, P., & Vansant, E. F. (2001). *Pillared clays: preparation, characterization and applications*. In *Synthesis* (pp. 265-288). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-69615-6_9

- Cordero López, R. (2005, November). *La Mictlancihuatl y el origen de los xochimilca*. Revista *Nosotros*. [https://nosotrosmx.com/2017/10/10/la-mictlancihuatl-y-el-origen-de-los-xochimilca/#:~:text=Quetzalcoatl recogió los huesos%2C los,dioses de los nueve cielos](https://nosotrosmx.com/2017/10/10/la-mictlancihuatl-y-el-origen-de-los-xochimilca/#:~:text=Quetzalcoatl%20recogió%20los,huesos%20de%20los%20nueve%20cielos).
- Costantino, U., Casciola, M., Massinelli, L., Nocchetti, M., & Vivani, R. (1997). *Intercalation and grafting of hydrogen phosphates and phosphonates into synthetic hydrotalcites and a.c.-conductivity of the compounds thereby obtained*. *Solid State Ionics*, 97(1-4), 203-212. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00043-X)
- Crepaldi, E. L., & Valim, J. B. (1998). *Hidróxidos duplos lamelares: Síntese, estrutura, propriedades e aplicações*. *Quimica Nova*, 21(3), 300-311. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000300011>
- Cuan Rojas, M., Cuan Alarcón, M., Soledad Carvajal, M. E., Xochitemo Cervantes, G., & Moreno Juárez, M. (2020). *La cal viva y su uso en la restauración*. [https://oxical.mx/imagenes/manual con teocali.pdf](https://oxical.mx/imagenes/manual%20con%20teocali.pdf)
- De la Cruz Zamora Ayala, V. (2003). *El conocimiento de los metales y su beneficio por los indígenas*. *Acta Universitaria*, 13(1), 36-48.
- De la Torre Villar, E. (Ed.). (1998). *Popol Vuh La creación del hombre*. En *Lecturas Históricas Mexicanas Tomo I* (2nd ed., pp. 91-102). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://historicas.unam.mx/publicaciones/publicadigital/libros/lecturas/hismex01.html>
- Deng, H., Wu, Y., Shahzadi, I., Liu, R., Yi, Y., Li, D., Cao, S., Wang, C., Huang, J., & Su, H. (2019). *Nanomaterials from mixed-layer clay minerals: structure, properties, and functional applications*. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 365-413). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00008-9>
- Dias, A. C., & Fontes, M. P. F. (2020). *Arsenic (V) removal from water using hydrotalcites as adsorbents: A critical review*. *Applied Clay Science*, 191, 105615. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105615>
- Dirección de Medios de Comunicación INAH. (2017). *Estudios revelan el colorido del mundo mexicana*. Boletín No. 10. https://www.inah.gob.mx/attachments/article/5856/20170116_boletin_10.pdf
- Djebbi, M. A., Bouaziz, Z., Elabed, A., Sadiki, M., Elabed, S., Namour, P., Jaffrezic-Renault, N., & Amara, A. B. H. (2016). *Preparation and optimization of a drug delivery system based on berberine chloride-immobilized MgAl hydrotalcite*. *International Journal of Pharmaceutics*, 506(1-2), 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.04.048>
- Domínguez, J. M., & Schifter, I. (1995). *Las arcillas: el barro noble* (1st ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Dong, J., & Zhang, J. (2019). *Maya blue pigments derived from clay minerals*. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 627-661). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00013-2>
- Feliciano Velázquez, P., & León-Portilla, M. (1992). *Códice Chimalpopoca: anales de Cuauhuitlán y Leyenda de los Soles* (U. Instituto de Investigaciones Históricas (Ed.); 3a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. www.historicas.unam.mx/publicaciones/publicadigital/libros/000/codice_chimalpopoca.html

- Fetter, G., & Bosch, P. (2010). *Pillared Clays and Related Catalysts*. In A. Gil, S.A. Korili, R. Trujillano, & M.A. Vicente (Eds.), *Pillared clays and related catalysts* (1st ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6670-4>.
- Fetter, G., Tichit, D., de Menorval, L. C., & Figueras, F. (1995). *Synthesis and characterization of pillared clays containing both Si and Al pillars*. *Applied Catalysis A: General*, 126(1), 165-176. [https://doi.org/10.1016/0926-860X\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0926-860X(95)00030-5).
- Fetter, G., Tichit, D., Massiani, P., Dutartre, R., & Figueras, F. (1994). *Preparation and characterization of montmorillonites pillared by cationic silicon species*. *Clays and Clay Minerals*, 42(2), 161-169. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1994.0420206>
- Fetter, G., & Velázquez-Herrera, F. D. (2020). *Las bondades y maldades de las arcillas*. *Materiales Avanzados*, 32(1), 24-28. <https://www.iim.unam.mx/MA/32/>
- Forano, C., Costantino, U., Prévot, V., & Gueho, C. T. (2013). *Layered double hydroxides (LDH)*. In *Developments in Clay Science* (Vol. 5, pp. 745-782). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00025-0>
- Fournier García, P., & Mondragón Barrios, L. (2012). *Las bebidas mexicanas. Pulque, mezcal y tesgüino*. *Arqueología Mexicana*, 114, 52-59.
- Galindo, R., López-Delgado, A., Padilla, I., & Yates, M. (2015). *Synthesis and characterization of hydrotalcites produced by an aluminium hazardous waste: A comparison between the use of ammonia and the use of triethanolamine*. *Applied Clay Science*, 115, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.032>
- García González, M. (2015). *Efluvios mensajeros. El copal y el yauhtli en los sahumeros del Templo Mayor*. *Arqueología Mexicana*, 135, 46-51.
- Garibay K., Á. M. (Selección introducción y notas). (2018). *Épica náhuatl* (Coordinación de Humanidades (Ed.); 5th ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garriz Ruiz, A., & Chamizo, J. A. (2003). *Del tequesquite al ADN: Algunas facetas de la química en México* (4a ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Garzón-Pérez, A. S., Paredes-Carrera, S. P., Martínez-Gutiérrez, H., Cayetano-Castro, N., Sánchez-Ochoa, J. C., & Pérez-Gutiérrez, R. M. (2020). *Efecto de la irradiación combinada de microondas-ultrasonido en la estructura y morfología de compuestos tipo hidrotalcita Al/Mg-CH₃COO y su evaluación en la sorción de un colorante reactivo*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 363-375. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Mat567>
- Géraud, E., Prévot, V., Ghanbaja, J., & Leroux, F. (2006). *Macroscopically ordered hydrotalcite-type materials using self-assembled colloidal crystal template*. *Chemistry of Materials*, 18(2), 238-240. <https://doi.org/10.1021/cm051770i>
- Gil, A., Korili, S.A., Trujillano, R., & Vicente, M.A. (Eds.). (2010). *Pillared clays and related catalysts*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6670-4>
- Gil, A., Korili, S.A., Trujillano, R., & Vicente, M.A. (2011). *A review on characterization of pillared clays by specific techniques*. *Applied Clay Science*, 53(2), 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.018>
- Gil, A., & Vicente, M. A. (2019). *Energy storage materials from clay minerals and zeolite-like structures*. In *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials* (pp. 275-288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00005-0>

- González Hurtado, A. (2020). *Técnica y arte en los murales mesoamericanos*. Arqueología Mexicana, 162(Marzo-Abril), 45-51. <https://raices.com.mx/tienda/revistas-la-pintura-mural-en-mesoamerica-AM162-digital>
- Gutiérrez Castorena, M. del C., Ortiz Solorio, C. A., Fernández Galán, B. S., Gutiérrez Castorena, E. V., González Vargas, T., Gutiérrez Castorena, M. del C., Ortiz Solorio, C. A., Fernández Galán, B. S., Gutiérrez Castorena, E. V., & González Vargas, T. (2017). *Los suelos del área de influencia del Códice Santa María Asunción y su representación pictórica*. Terra Latinoamericana, 35(2), 101-111. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000200101&lng=es&nrm=i-so&tlng=es
- Han, Z., Fina, A., & Malucelli, G. (2015). *Thermal shielding performances of nano-structured intumescent coatings containing organo-modified layered double hydroxides*. Progress in Organic Coatings, 78, 504-510. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.06.011>
- Haro, C., De La Torre, E., Aragón, C., & Guevara, A. (2014). *Regeneración de arcillas de blanqueo empleadas en la decoloración de aceites vegetales comestibles*. Revista EPN, 34(1), 1-8. <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/RegeneraciondeArcillasdeBlanqueo.pdf>
- Hur, T.-B., Phuoc, T. X., & Chyu, M. K. (2010). *New approach to the synthesis of layered double hydroxides and associated ultrathin nanosheets in de-ionized water by laser ablation*. Journal of Applied Physics, 108(11), 114312. <https://doi.org/10.1063/1.3518510>
- Jia-Rui, C. C. (2013). *Clay-Like Minerals Found on Icy Crust of Europa. Solar System and Beyond*. <https://www.nasa.gov/jpl/news/europa-clay-like-minerals-20131211.html>
- Jin, W., Lee, D., Jeon, Y., & Park, D.-H. (2020). *Biocompatible hydrotalcite nanohybrids for medical functions*. Minerals, 10(2), 172. <https://doi.org/10.3390/min10020172>
- Johnson, I. D., Werpy, T. A., & Pinnavaia, T. J. (1988). *Tubular silicate-layered silicate intercalation compounds: a new family of pillared clays*. Journal of the American Chemical Society, 110(25), 8545-8547. <https://doi.org/10.1021/ja00233a041>
- Klopprogge, J. T., Hickey, L., & Frost, R. L. (2004). *The effects of synthesis pH and hydrothermal treatment on the formation of zinc aluminum hydrotalcites*. Journal of Solid State Chemistry, 177(11), 4047-4057. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2004.07.010>
- Korkusuz, Ç., & Tüzüm Demir, A. P. (2020). *Evaluation of the thermal stabilization behavior of hydrotalcite against organic stabilizers for plasticized PVC films*. Polymer Bulletin, 77(9), 4805-4831. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02977-8>
- Kurian, M., & Kavitha, S. (2016). *A review on the importance of pillared interlayered clays in green chemical catalysis*. IOSR Journal of Applied Chemistry, 47-54. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/ICETEM/Vol.1 Issue 1/04-47-54.pdf>
- Lagaly, G., Mecking, O., & Penner, D. (2001). *Colloidal magnesium aluminum hydroxide and heterocoagulation with a clay mineral. I. Properties of colloidal magnesium aluminum hydroxide*. Colloid & Polymer Science, 279(11), 1090-1096. <https://doi.org/10.1007/s003960100525>
- Li, Z., Yang, B., Zhang, S., Wang, B., & Xue, B. (2014). *A novel approach to hierarchical sphere-like ZnAl-layered double hydroxides and their enhanced adsorption capability*. Journal of Materials Chemistry A, 2(26), 10202. <https://doi.org/10.1039/c4ta01028k>

- Lobo-Sánchez, M., Nájera-Meléndez, G., Luna, G., Segura-Pérez, V., Rivera, J. A., & Fetter, G. (2018). *ZnAl layered double hydroxides impregnated with eucalyptus oil as efficient hybrid materials against multi-resistant bacteria*. *Applied Clay Science*, 153(October 2017), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.017>
- López Luján, L., Torres, J., & Montúfar, A. (2003). *Los materiales constructivos del Templo Mayor de Tenochtitlan*. *Estudios de Cultura Náhuatl*, 34, 137–166.
- Meunier, A. (2005). *Clays*. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Michalik, A., Napruszewska, B. D., Walczyk, A., Krysiak-Czerwenka, J., Duraczynska, D., & Serwicka, E. M. (2020). *Synthesis of nanocrystalline Mg-Al hydrotalcites in the presence of starch—the effect on structure and composition*. *Materials*, 13(3), 602. <https://doi.org/10.3390/ma13030602>
- Millot, G. (1972). *Geology of clays—Weathering, sedimentology, geochemistry*. In *Sedimentary Geology* (Vol. 7, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(72\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(72)90004-8)
- Miyata, S. (1983). *Anion-exchange properties of hydrotalcite-like compounds*. *Clays & Clay Minerals*, 31(4), 305–311. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1983.0310409>
- Mukherjee, S. (2013). *The Science of Clays*. In *The Science of Clays*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6683-9>
- Patiño-Puente, J. V. (2010). *La cerámica en el arte precolombino: una aproximación*. *Revista de Claseshistoria*, 167, 8. <http://www.claseshistoria.com/revista/index.html>
- Pérez, E., Ayele, L., Getachew, G., Fetter, G., Bosch, P., Mayoral, A., & Díaz, I. (2015). *Removal of chromium(VI) using nano-hydrotalcite/SiO₂ composite*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 1555–1561. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.05.009>
- Pergher, S. B. C., Detoni, C., & Mignoni, M. L. (2005). *Materiais laminares pilarizados: preparação, caracterização, propriedades e aplicações*. EdiFAPES.
- Pijoan, M. (2003). *Medicina y etnobotánica aztecas*. In *Offarm* (Vol. 22, Issue 9). Doyma. <http://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-medicina-etnobotanica-aztecas-13053128>
- Rao, Y., Wang, Y., Ning, H., Li, P., & Wu, M. (2016). *Hydrotalcite-like Ni(OH)₂ nanosheets in situ grown on nickel foam for overall water splitting*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(49), 33601–33607. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11023>
- Rathod, V. T., Kumar, J. S., & Jain, A. (2017). *Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace applications*. *Applied Nanoscience*, 7(8), 519–548. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0592-9>
- Richetta, M., Medaglia, P., Mattoccia, A., Varone, A., & Pizzoferrato, R. (2017). *Layered double hydroxides: tailoring interlamellar nanospace for a vast field of applications*. *Journal of Material Science & Engineering*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000360>
- Rives, V. (2001). *Layered double hydroxides: present and future*. “Nova Publishers”.
- Saju, D., & Sabu, T. (2020). *Layered double hydroxides: fundamentals to applications*. In T. Sabum & D. Saju (Eds.), *Layered double hydroxide polymer nanocomposites* (1st ed., pp. 1–68). Woodhead Publishing.
- Santamaría, L., Vicente, M. A., Korili, S. A., & Gil, A. (2020). *Progress in the removal of pharmaceutical compounds from aqueous solution using layered double hydroxides as adsorbents:*

- A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104577. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104577>
- Secretaría de Economía. (2015). *Perfil de mercado de la bentonita*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564109/Bentonita_2020_ENE_.pdf
- Segura-Pérez, V., Lobo-Sánchez, M., Velázquez-Herrera, F. D., Frías-Vázquez, D. A., Reyes-Cervantes, E., & Fetter, G. (2020). *Hydrotalcite/hydroxyapatite composites with high bacterial activity against clinical bacteria. A new alternative to prevent osteomyelitis diseases*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 298(November 2019), 110069. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110069>
- Selley, R. C., Cocks, L. R. M., & Plimer, I. R. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of geology*. Elsevier.
- Silvan, L. (1963). *Sobre cronología de la cerámica*. 13, 253-258.
- Theiss, F. L., Ayoko, G. A., & Frost, R. L. (2016). *Synthesis of layered double hydroxides containing Mg²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺ and Al³⁺ layer cations by co-precipitation methods - A review*. *Applied Surface Science*, 383, 200-213. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.150>
- Tichit, D., Ribet, S., & Coq, B. (2001). *Characterization of calcined and reduced multi-component Co-Ni-Mg-Al-layered double hydroxides*. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2001(2), 539-546. [https://doi.org/10.1002/1099-0682\(200102\)2001:2<539::AID-EJIC539>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1099-0682(200102)2001:2<539::AID-EJIC539>3.0.CO;2-R)
- Varas, M. J., Álvarez de Buergo, M., & Fort, R. (2007). *Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción*. Ciencia, Tecnología y Sociedad: Para Una Conservación Sostenible Del Patrimonio Pétreo, 179-189. [http://digital.csic.es/bitstream/10261/8631/1/Varas_MaJose,capítulo de libro CTS.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/8631/1/Varas_MaJose,capitulo%20de%20libro%20CTS.pdf)
- Velázquez-Herrera, F. D., Fetter, G., Rosato, V., Pereyra, A. M., & Basaldella, E. I. (2018). *Effect of structure, morphology and chemical composition of Zn-Al, Mg/Zn-Al and Cu/Zn-Al hydrotalcites on their antifungal activity against A. niger*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3376-3383. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.069>
- Velázquez-Herrera, F. D., González-Rodal, D., Fetter, G., & Pérez-Mayoral, E. (2020a). *Towards highly efficient hydrotalcite/hydroxyapatite composites as novel catalysts involved in eco-synthesis of chromene derivatives*. *Applied Clay Science*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105833>
- Velázquez-Herrera, F. D., González-Rodal, D., Fetter, G., & Pérez-Mayoral, E. (2020b). *Enhanced catalytic performance of highly mesoporous hydrotalcite/SBA-15 composites involved in chromene multicomponent synthesis*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 309, 110569. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110569>
- Velázquez-Herrera, F. D., Lobo-Sánchez, M., Carranza-Cuautle, G. M., Sampieri, Á., del Rocío Bustillos-Cristales, M., & Fetter, G. (2022). *Novel bio-fertilizer based on nitrogen-fixing bacterium immobilized in a hydrotalcite/alginate composite material*. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17943-z>
- Velázquez-Herrera, F. D., Lobo-Sánchez, M., & Fetter, G. (2021). *Novel bio-fertilizer based on nitrogen fixing bacterium immobilized in a hydrotalcite/alginate hybrid material*. *Applied Soil Ecology*.

- Velde, B. (1992). *Introduction to Clay Minerals*. In Soil Science (Vol. 156, Issue 4). Springer-Science + Business Media, B.V. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2368-6>
- Velde, B. (1995). *Origin and Mineralogy of Clays*. In B.Velde (Ed.), *Origin and Mineralogy of Clays* (1st ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6>
- Velde, B., & Barré, P. (2017). *Soils, Plants and Clay Minerals*. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (1st ed., Vol. 53, Issue 9). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03499-2>
- Wang, J., Stevens, L. A., Drage, T. C., & Wood, J. (2012). Preparation and CO₂ adsorption of amine modified Mg-Al LDH via exfoliation route. *Chemical Engineering Science*, 68(1), 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.052>
- Wang, W., & Wang, A. (2019). *Palygorskite nanomaterials: structure, properties, and functional applications*. In *Nanomaterials from Clay Minerals* (pp. 21-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00002-8>
- Wilhide, L., & Hodge, S. (2017). *Cerámica*. Editorial Gustavo Gili, SL.
- Yu, J. J., Jiang, Z., Zhu, L., Hao, Z. P., & Xu, Z. P. (2006). *Adsorption/desorption studies of NO_x on well-mixed oxides derived from Co-Mg/Al hydrotalcite-like compounds*. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(9), 4291-4300. <https://doi.org/10.1021/jp056473f>