



© Fondo de Cultura Económica

LAS ARCILLAS: EL BARRO NOBLE

Autor: JOSÉ MANUEL DOMÍNGUEZ / ISSAC SCHIFTER

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [POEMA](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)
- [I. ¿QUÉ SON LAS ARCILLAS?](#)
- [II. RECONSTRUYENDO LA NATURALEZA: LA INGENIERÍA MOLECULAR](#)
- [III. UN REACTOR DE BARRO](#)
- [IV. CONCLUSIONES](#)
- [LECTURAS RECOMENDADAS](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



EDICIONES

Primera edición, 1992

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1992, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE CV.

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3743-7

Impreso en México



DEDICATORIA

A XÓCHITL, DAVID, MIRANDA y MARIANA DOMÍNGUEZ

A LILIANA y DANIEL SCHIFTER



POEMA

Polvo de mi madre tierra,
generosa, del Bajío,
polvo del que yo naciera
polvo al viento, polvo mío.
(Poema mexicano)

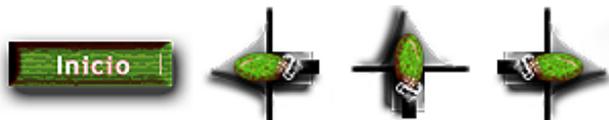


INTRODUCCIÓN

Frente a los recientes avances científicos y tecnológicos en el campo de los nuevos materiales sintéticos, en que se habla de superconductores cerámicos, plásticos compuestos, aleaciones ultraligeras y detectores fotónicos, parecería que el propósito de escribir un libro sobre las arcillas pudiera ser una tarea de historiadores más que de investigadores científicos. Pues, ¿qué más podrían ofrecer estos materiales que ya no lo hayan hecho?, se preguntará el lector y tal vez se tenga la impresión de que el tema ha sido abandonado en los centros de investigación del mundo entero. No obstante, es propósito de este libro demostrar justamente lo contrario y, aún más, de ilustrar qué son estos polvos tan familiares, cómo podemos conocerlos y modificarlos en nuestro provecho y de qué manera están relacionados con nuestra vida cotidiana, es decir que "aún queda mucha tela de donde cortar..."

Los avances recientemente logrados en los métodos de la investigación científica, los nuevos conceptos en la física y la química de la materia, las técnicas espectroscópicas y el conocimiento de los mecanismos de interacción molecular, por mencionar sólo algunos de los desarrollos más significativos, han producido un efecto notable en lo que se refiere a la explicación del universo que nos rodea. Ello hace que veamos a los materiales ya muy conocidos, como las arcillas, a través de una lente conceptual más poderosa de la que derivemos un conocimiento más rico acerca de sus propiedades que nos conducirá a un mundo de aplicaciones en donde el límite es la imaginación.

A través de la lectura de esta obra veremos de manera clara cómo el barro natural, que ha sido utilizado por el hombre desde hace siglos en la construcción de habitaciones, en la alfarería tradicional e inclusive en la medicina naturista, se convierte mediante la ingeniería molecular en arcilla pilareada y en un reactor molecular donde se alojan y reaccionan las moléculas de petróleo para convertirse en gasolinas; veremos también a las arcillas actuar como protagonistas en el origen de la vida en la Tierra y la especulación que despierta en el ámbito científico esta proposición. También aprenderemos juntos acerca del gran reto que tiene ante sí la comunidad de científicos: El diseño "a la medida" de las propiedades de un sólido o de un material, a escala molecular, para lo cual es necesario que ciencias como la física y la química se entrecrucen, dando origen a nuevas especialidades, entre ellas, la ingeniería molecular, que desempeñará un papel importante en un futuro cercano.



I. ¿QUÉ SON LAS ARCILLAS?

A ESTA pregunta sencilla le podemos buscar una respuesta de acuerdo con el pensamiento de Campoamor: " ... todo es según el color, del cristal con que se mira". Es decir que si desde el punto de vista geológico las arcillas son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra, para el artista constituyen los materiales plásticos o los pigmentos que le permiten expresar, mediante formas y composiciones de color, un estado de alma o de conciencia que puede ser bello.

Desde un punto de vista utilitario las arcillas han sido los materiales preferidos por el hombre para la manufactura de utensilios que sirven en la cocción y el consumo de sus alimentos, de vasijas de barro para almacenar y añejar el vino, de piezas finas de porcelana, así como pisos de mosaico y embaldosados.

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no lo percibamos, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas, como en los juguetes, en las partes de automóvil y en otros componentes que son, además, resistentes a la flama y al desgaste. Algunos productos de alta tecnología incorporan a las arcillas en alta proporción, como los convertidores catalíticos que se utilizan en el control de emisiones contaminantes de los vehículos de motor, o bien en el papel incombustible con que se provee a los astronautas desde el accidente del *Challenger* o en las revistas de alta calidad.

Existen otras aplicaciones masivas de las arcillas minerales: los lodos de perforación de los pozos petroleros, los moldes de fundición y los catalizadores empleados en la refinación del petróleo.

No faltan las aplicaciones en el campo farmacéutico y en los productos de belleza, ya que las arcillas forman parte importante de los talcos desodorantes, jabones y cremas, pastas de dientes, etc. Pero ¡dejemos esa lista interminable!, y volvamos a la pregunta original: ¿Qué son las arcillas?

El diccionario nos dice lo siguiente:

Las arcillas son las rocas blandas que se hacen plásticas al contacto con el agua, siendo frágiles en seco, y con gran capacidad de absorción.

La Enciclopedia las define así:

La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho.

La Enciclopedia técnica dice:

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados [¡1 micra es la diezmilésima parte de un centímetro! o sea la dimensión aproximada de los microbios comunes].

Encontramos pues una serie de conceptos que van más allá de la noción de "tierrita" que teníamos originalmente. Por ejemplo, los sedimentos referidos en la definición anterior son aquellos minerales naturales que se han depositado en los lechos de lagos y mares por la acción de arrastre de los ríos. El material granuloso puede ser tan fino que podríamos poner un gránulo en la pata de una mosca ¡sin que se entere de que lo lleva! Con la ayuda de un microscopio óptico podríamos amplificar la imagen de uno de estos granos hasta llegar a unas dos mil veces, pudiendo observar así el objeto de cuatro micras con el tamaño de un grano de arroz. No obstante, la rugosidad y la estructura interna del grano no son observables a esos niveles de amplificación. Necesitaríamos de un instrumento más poderoso: el microscopio electrónico, con el que es posible alcanzar una amplificación de unos quince mil aumentos. Así, el grano que veíamos antes como un grano de arroz ahora se nos convierte en una hojuela con los

bordes curvados hacia arriba, tal y como se muestra en la figura 1. Esta hojuela se asemeja a las placas de barro en un suelo secado, contraído y agrietado por el Sol. ¿No es así? Ahora bien, ¿qué pasa si observamos la hojuela con mayor amplificación? Veremos que, a medida que aumenta el tamaño de la hojuela, nos vamos concentrando más y más en una pequeña porción del material, tal y como se muestra en la figura 2, donde observamos el borde de la hojuela a 200 000 aumentos, es decir que ahora un centímetro de la figura 2 equivale a ¡la veinteava parte de una micra, o sea a cinco millonésimas partes de un centímetro!, así, vemos en la figura 2 que, a esta escala, el borde de la hojuela parece formado por una serie de láminas apiladas una encima de la otra, dispuestas como si fueran las hojas de un libro, o de un pastel ¡mil hojas!, ¿no es así?



Figura 1. Hojuela de arcilla amplificada 15 000 veces.

Aún más, si ponemos en contacto a la arcilla con el agua, veríamos cómo las hojuelas se separan unas de otras, abriéndose, y si las secamos extrayendo el agua absorbida entonces observaríamos el efecto de contracción del espacio entre las láminas, ¡como si fuera un acordeón químico!

Se menciona en las definiciones precedentes que la arcilla es un silicoaluminato hidratado, es decir que desde el punto de vista químico está compuesta de silicio (**Si**), aluminio (**Al**), oxígeno (**O**) e hidrógeno (**H**). Por ello, nada más natural que comenzar nuestro tema echando una mirada a esa familia de minerales, los silicatos, que forman el árbol genealógico de las arcillas. Abrochemos pues nuestros cinturones y emprendamos la búsqueda de las características íntimas de las arcillas.

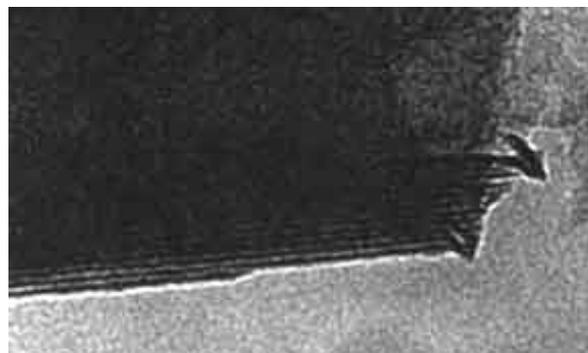


Figura 2. Borde de la hojuela amplificado 20 000 veces.

EL ORIGEN DE LOS SILICATOS

Aun con las técnicas modernas disponibles hoy en día, el conocimiento que tenemos de la corteza terrestre es muy limitado, ya que sólo se ha explorado una pequeñísima porción del casquete superficial, es decir aproximadamente los primeros cuatro kilómetros a partir de la superficie, o sea el 0.062% del diámetro terrestre (12 740 km). Sin embargo, mediante métodos indirectos, como los sismológicos, se ha logrado poner en evidencia que la estructura interna de la Tierra, a semejanza de una cebolla, está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así, hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice (SiO_2) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluida que la capa SIAL. La capa SIMA es considerada la madre directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido: los granitos. Las segregaciones del magma caliente, su migración y su compactación posteriores, dieron origen a diversos minerales, como las cromitas, magnetitas, corindón, sienitas, mármoles y cuarcitas, entre otros. Unos más resultaron de la presión de los suelos al replegarse, como ocurrió con el grafito.

La acción de los vapores y de los gases calientes sobre las primeras rocas condujo a su alteración y a la consecuente formación de mezclas finas de minerales. Estas últimas permanecieron en forma de residuos o bien fueron transportadas y depositadas en los lechos de los ríos y en los fondos marinos. El arrastre y depósito de esas mezclas finas pudo efectuarse por vía fluvial, es decir, por acción de los ríos o bien por medio de los glaciares y los vientos. El resultado fue su depósito en los lechos lacustres y marinos, lo cual produjo los yacimientos más importantes.

Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. La corteza tiene una densidad media de 2.7, mientras que la densidad media de la Tierra es de 5.5, o sea que en el interior se concentran los elementos más pesados, hierro, níquel, etcétera.

Pero, ¿por qué son importantes los silicatos? A esta pregunta que el lector pudo haber formulado se le ha de buscar una respuesta que ya fue mencionada en la primera parte de esta obra: Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas.

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo y, como veremos, su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares.

Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes —o bien a partir de la arcilla original—, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas. Curiosamente, estos mecanismos están relacionados con la latitud en el planeta, de modo que encontramos que el primer mecanismo fue más común en las regiones árticas, mientras que la neoformación y la transformación resultaron dominantes en los trópicos húmedos. A las arcillas que se presentan en la naturaleza como una pasta suave se les llama "lodos", mientras que aquellas que tienen la apariencia de un sólido blancuzco se les denomina *piedra lodosa* o bien *roca laminada* (en inglés: *shale*). Es importante que a los depósitos de arcilla se les nombre *arcillosos*, a fin de distinguirlos de los depósitos arenosos y además *plásticos*, a fin de diferenciarlos de las rocas ígneas.

A continuación se presenta un glosario de los apelativos más comunes de algunas arcillas:

arcilla figulina: es aquella que contiene impurezas como la arena, la caliza y los óxidos de hierro.

arcilla refractaria: es rica en óxidos metálicos y tiene la propiedad de ser muy resistente al calor.

arcilla roja: esta clase la integra generalmente un depósito de tipo marino formado por los restos de materiales calcáreos y ferrígenos, polvo volcánico, restos de esponjas silíceas, dientes de tiburón, etc. El color rojizo proviene por lo común de sus componentes férricos. Se ha encontrado que estos depósitos son muy extensos, y cubren hasta el 60% de la superficie marina.

arcilla ferruginosa: contiene en su composición diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro y puede ser de color amarillo, ocre e inclusive negra (tierras de Siena) debido al óxido de hierro hidratado, mientras que las arcillas rojas contienen, por lo general, un óxido conocido como hematita. Esta particularidad de las arcillas explica por qué en algunas regiones el barro es negro o rojizo, lo cual incide en los colores de la cerámica que se fabrica a partir de estos materiales. Recordemos en este punto al barro negro de Oaxaca, tan distinto de la cerámica ocre o rojiza de la zona central del valle de México.

arcilla magra y arcilla grasa: estos materiales contienen cierto grado de impurezas, lo que afecta sus propiedades plásticas, es decir, que a mayor contenido de impurezas se obtiene una pasta menos plástica (arcilla magra) al amasarla con agua.

arcilla de batán: llamadas también *tierra de batán*, debido al uso que tuvieron en el "batanado" de las telas y de las fibras vegetales como el algodón. Este proceso consistía en limpiar las fibras formadas en la máquina (batán) eliminando la materia grasa mediante la adición de arcilla, por lo general del tipo esmectita, cuyo nombre proviene del griego *smektikós*: "que limpia."

arcilla marga: es un material impermeable y frágil, con un contenido de caliza de entre 20 y 60%, aproximadamente.

arcillas de esquisto o pizarra: las constituyen formaciones antiguas que se presentan en forma de estratos o de plaquetas paralelas que se han dividido por la presión del suelo.

arcilla atapulgita: también conocida como *tierra de Florida* o *floridrín*, aunque algunas veces se la llamó *tierra de Fuller*. El último apelativo se empleó también para denominar a las sepiolitas. Actualmente la atapulgita es llamada paligorskita.

arcilla bentonita: nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, las que, tratadas con compuestos químicos aminados (p. ej. dodecilamonio) se vuelven repelentes al agua —hidrofóbicas—, aunque mantienen gran afinidad por las especies orgánicas, en particular los aceites, las grasas y los colorantes o pigmentos naturales. El nombre bentonita proviene de Fort Benton, Wyoming, EUA, donde W. C. Knight descubrió un enorme yacimiento de este tipo de arcilla en 1896.

FORMACIONES ARCILLOSAS EN MÉXICO

Los trabajos de investigación realizados por Enciso (1968) y De Pablo (1990) indican que el territorio nacional estuvo sujeto a una gran actividad volcánica durante los periodos Oligoceno-Mioceno, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de rocas vidriosas que a su vez fueron alteradas y dieron origen a la mayor parte de las arcillas que encontramos en México. Estas son, por lo regular, del tipo montmorillonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país, en el Estado de Durango, siendo las de Cuencamé, Velardeña, Pedriceña, Rodeo y Nazas las más conocidas y las que actualmente se encuentran en explotación.

También existen depósitos importantes en Puebla, en los límites de Tlaxcala y Puebla, en Chupaderos, Zacatecas, en Oaxaca, en Neutla, Guanajuato, en Huayacocotla, Veracruz y en numerosas formaciones menores localizadas en

las antiguas zonas lacustres como el valle de México (Figura 3).



Figura 3. Depósitos arcillosos en México.

Sin duda la zona localizada en Durango es la más extensa y se sabe ahora, gracias a los trabajos de Enciso y De Pablo que esas arcillas fueron originadas por la alteración de las rocas piroplásticas depositadas previamente en el valle por medio de una *nube ardiente*. La subsecuente alteración de tales rocas ígneas y la deposición del material alterado en suelo seco dio origen al mineral arcilloso más rico en potasio, como el de la zona de Vizcarra, mientras que el mineral depositado en la zona lacustre (de origen marino aparentemente) se alteró y produjo las arcillas color verde y rosa típicas de la región de Cuencamé. Estas formaciones se encuentran a una altura de 1 340 m sobre el nivel del mar, en el valle de Cuencamé-La Lagunilla, que se extiende hasta Pedriceña y por el oeste hasta Rodeo y Nazas, donde la altura disminuye a 1 128 m. Esta zona contiene los depósitos más importantes de México, que representan un gran potencial económico. En su mayor parte la calidad de la arcilla es superior, del tipo montmorillonita expandible, y ocurre en concentraciones variables según la zona, es decir 85% en la región de Pedriceña, 50 a 70% en Nazas, un 50% en Las Cuevas y una porción variable en Cuencamé. En esta última se encuentran frentes de color blanco y rosa con espesores entre 2 y 6 m, mientras que la arcilla que se encuentra en contacto con el polvo alterado tiene sólo un espesor de 50 cm y su color es verde, cambiando luego a rosa y presentando frentes de hasta 4 y 8 m de espesor.

LA NOBLEZA DEL BARRO

Las arcillas o lodos heredados de los continentes y depositados, neoformados o transformados, en los lechos marinos, lacustres, fluviales o estuarinos, han provocado cambios espectaculares en el planeta Tierra. Que digan si no es así la formación del petróleo, la de las moléculas orgánicas prebióticas que dieron origen a la vida y la de los suelos agrícolas, sin mencionar el surgimiento de las civilizaciones que hicieron uso del barro cocido en la manufactura de su cerámica.

En efecto, la mayor parte de las cimas de los yacimientos de petróleo de las costas del Golfo de México (EUA-México) ocurren a la profundidad en la que usualmente se produce la transformación de las arcillas tipo esmectita (E) en las denominadas illitas (I). Ambas tienen la misma estructura laminar, como se verá en detalle más adelante, excepto que las segundas no son expandibles debido a las fuertes cargas electrostáticas que mantienen a las hojas ligadas. Así, la transformación de la esmectita en illita pudo haber desempeñado papel importante en la génesis del petróleo: al ser contenidas las moléculas orgánicas en el interior del espacio interlaminar de la esmectita, aquellas estaban "protegidas" de la oxidación y sujetas a un proceso de tipo catalítico que pudo haberlas convertido en

petróleo, tal y como ahora lo conocemos. Pero es un hecho experimental que la sustitución del silicio (**Si**) por aluminio en las hojas que componen el *acordeón químico* de la esmectita, origina un exceso de carga electrostática negativa en las hojas, de tal magnitud a escala molecular que provoca la deshidratación del potasio (**K**), el cual se encuentra comúnmente en el espacio interlamilar de las arcillas. Luego, el agua así expulsada pudo haber acarreado en su paso a los hidrocarburos formados en el interior de las arcillas, mientras que la contracción subsecuente de las hojuelas de arcilla deshidratada podría haber provocado un colapso en el material, dejando hendiduras y poros por los que pudo migrar el fluido hacia los recipientes rocosos.

Por otro lado, la estructura laminar de las arcillas permite el almacenamiento de agua en el espacio interlamilar, formando así agregados lodosos difíciles de romper. La combinación de la arcilla con la materia orgánica del suelo y algunos óxidos minerales contribuye a la estabilidad estructural necesaria para resistir los efectos mecánicos destructivos. La porosidad interna de las hojuelas de arcilla y su carga electrostática asociada son adecuadas para la absorción de especies tales como los cationes de potasio (**K⁺**), magnesio (**Mg⁺⁺**) y amonio (**NH₄⁺**), los cuales son liberados bajo condiciones ácidas apropiadas, pudiendo ser absorbidos por las raíces de las plantas.

La acidez es provocada por una acumulación de iones de hidrógeno (**H⁺**) provenientes de compuestos químicos disueltos en el agua y acarreados por las lluvias; en ellos la concentración ácida llega a ser tal que algunos de los otros cationes atrapados por las arcillas, como los iones **Al³⁺** se disuelven rápidamente en las soluciones, pasando a las raíces vegetales y provocando efectos tóxicos en las plantas. Es por ello que un suelo fértil debe estar balanceado en lo que a la acidez se refiere y el tratamiento en este caso consiste en la neutralización de la acidez mediante la agregación de compuestos alcalinos, como el carbonato de calcio. Luego tenemos que la combinación de acidez e intercambio iónico en las arcillas del terreno es importante en el desarrollo de los suelos agrícolas.

Éstos, en la actualidad, se encuentran expuestos a las contaminaciones por lluvia ácida proveniente de las zonas industriales y por los abonos químicos y plaguicidas, los cuales son absorbidos por las arcillas minerales provocando los efectos combinados de acidez e intercambio mencionados. En cualquier caso, las arcillas son las protagonistas en la formación de los suelos agrícolas y sus propiedades son determinantes para el crecimiento de los vegetales. Por otra parte, la mineralogía del suelo es resultado de diversos factores, el clima y el intemperismo, así tenemos que en las regiones tropicales predominan los caolines mezclados con óxidos minerales (oxisoles) y los suelos negros formados por esmectitas expandibles (vertisoles) combinadas. Si la acidez es baja (**pH > 6**) el suelo arcilloso tiende a ser rico en calcio, en cambio si la acidez es alta (**pH < 6**) el aluminio tiende a ser más abundante, lo que trae efectos tóxicos para la vegetación. Otros cationes, como el amonio, los nitratos y los fosfatos, también son retenidos por las arcillas del suelo e intercambiados bajo condiciones de humedad y acidez adecuadas, siendo realmente accesibles a las plantas y representando una fuente importante de nutrientes. La composición óptima del suelo debe incluir una fracción de arcilla compuesta de partículas menores a 2 micras, y una proporción mayor de sedimentos con tamaños de partícula entre 2 y 60 micras. Esta combinación parece incluir las mejores características para el cultivo y crecimiento de las raíces vegetales. Es claro, pues, que las arcillas son los componentes del suelo que provocan la mayor influencia en su productividad.

No menos importante ha sido la interacción de las arcillas con las moléculas orgánicas. Su afinidad por las bases orgánicas nucleicas, como la guanina, la citosina, etc., ha provocado interés creciente entre la comunidad científica que trata de atribuir un papel preponderante a los compuestos minerales de tipo laminar en la formación de las moléculas prebióticas. Más adelante, en el capítulo III, se ampliará esta idea con base en una mejor comprensión de la estructura de las arcillas y su posible relación con el origen de la vida en el planeta.

Otros usos de la interacción del barro (arcilla) con las moléculas orgánicas lo encontramos en la manufactura de la cerámica en la antigüedad. Baste mencionar el uso que los griegos daban a los pigmentos vegetales para la obtención de la cerámica negra y roja, típica del arte de Micenas. Otros ejemplos más sorprendentes los encontraremos en el curso de esta obra en la que estudiaremos la porcelana china del periodo Sung (969-1279 *d.c.*), la llamada porcelana de "cáscara de huevo" que, debido a su fineza y alta resistencia sorprendió al mundo occidental. Su delicadeza era tal que ya en el siglo IX se hablaba de los vasos de porcelana china translúcida, que dejaban ver los líquidos contenidos en su interior. Se decía que las piezas de porcelana de esta clase trascendían a la naturaleza humana. En cualquiera de los casos precedentes, la arcilla mineral ha sido la protagonista y, gracias a su abundancia natural y accesibilidad, el barro tradicional ha tenido un papel importante en el desarrollo de las primeras civilizaciones. Desde muy temprano, el hombre observó que los objetos de barro húmedo se contraen y endurecen al secarse por la acción del calor y que su resistencia mecánica en esas condiciones es suficiente. Aunque estas propiedades son tan familiares que hacen pensar en una serie de características simples, ha tomado muchos años desentrañar los secretos que dieron origen a las propiedades mencionadas. Ahora que se cuenta con

instrumentos analíticos poderosos y con métodos de cálculo avanzados, la sorpresa ha sido mayúscula al comprobarse que donde se esperaba encontrar una estructura simple y rígida, se tiene un arreglo complejo y flexible. Se ha venido encontrando que el horizonte llano presenta en realidad profundos abismos y montañas en lo que se refiere a la física y la química de las arcillas minerales. Un tema de investigación que parecía pertenecer al pasado se descubre ahora como fuente inagotable de nuevos conocimientos y nuevas aplicaciones. Todas estas características sólo hablan de la nobleza de un material y nos dan la esperanza de que con el polvo se han de construir y transformar grandes cosas para beneficio del hombre.

EL ÁRBOL GENEALÓGICO: LOS SILICATOS

No fue sino hasta el año de 1912 cuando, gracias a los físicos W. L. Bragg y M. Laue, que descubrieron las propiedades de los rayos X, fue posible desentrañar la estructura interna de los minerales. Estos son compuestos cristalinos, es decir, que a escala molecular están formados por planos y caras muy bien definidos, los cuales tienen la propiedad de dispersar los rayos X y producir así patrones de interferencia, los cuales nos proporcionan información muy valiosa sobre los arreglos cristalinos de las sustancias minerales.

Después, con el microscopio electrónico, desarrollado por primera vez por E. Ruska en 1931, fue posible observar directamente los cristales minerales, su forma y su geometría.

Mediante las técnicas apuntadas, se sabe que los silicatos están formados por cristales regulares y, si vamos a una escala más pequeña, veríamos que estos cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro (en griego "cuatro caras"), tal y como se ilustra en la figura 4. Este es el *tabique elemental* con que podemos construir los edificios moleculares que forman a los silicatos, ¡interesante!, ¿no es así? Veamos más de cerca cómo se piensa que esto ocurre.

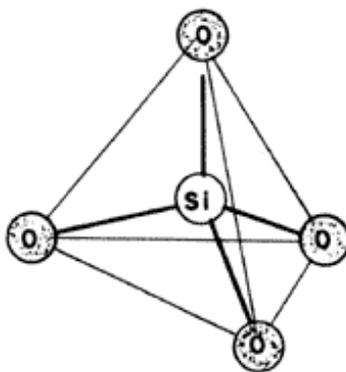
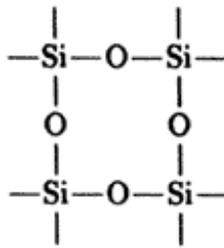


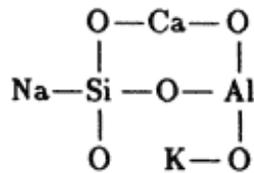
Figura 4 (a). El tetraedro elemental o la pirámide triangular.

El tetraedro de la figura 4 está compuesto por un átomo central de silicio (**Si**) y cuatro átomos de oxígeno en las esquinas (**O**).

Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central (**Si**), mientras que las esquinas todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva. Cuando esto último ocurre, entonces tenemos que se puede formar una cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo: **...-O-Si-O-Si-O-Si-O-...**



Similarmente, mediante este mecanismo podemos formar cadenas verticales que se unen a las cadenas horizontales para formar redes, de la manera siguiente: si seguimos armando este "Mecano", podemos superponer una red encima de otra, a manera de formar arreglos tridimensionales. También podemos sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (**Al**), con lo cual el arreglo quedaría desbalanceado, ya que el aluminio sólo tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa "extra" en uno de los átomos de oxígeno, por ejemplo:



Como se observa en este esquema, la carga negativa desbalanceada puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (**Na**) o el potasio (**K**), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra.

Existen dos reglas básicas que nos dicen cómo unir dos o más tetraedros (Reglas de Pauling):

1) La suma de las cargas negativas debe ser igual a la suma de las cargas positivas, de manera que la estructura sea eléctricamente neutra.

2) Todos los elementos con carga positiva (cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, coordinándose con ellos de modo que los arreglos coordinados dependen únicamente de los tamaños entre el catión (+) y el anión (-) respectivo.

Existe una tercera regla conocida como Regla de Lowenstein: No es válido enlazar dos tetraedros que tengan un átomo central de aluminio cada uno. Esto nos indica que dos tetraedros de aluminio sólo pueden enlazarse mediante otro tetraedro intermedio a base de silicio.

Siguiendo estas sencillas reglas podemos armar el mecano de manera que un tetraedro (**1T**) pueda unirse a otro para formar un arreglo tipo **2T** (dos tetraedros) o bien **3T**, ..., etc. Así, en la figura 5 (a) se reúnen todas las posibles combinaciones de tetraedros que dan origen a una serie de vistosas geometrías, en forma de cadena simple, doble, redes de motivos hexagonales, etc. Lo más sorprendente es que cada uno de estos arreglos es típico de alguno de los silicatos minerales más conocidos. Así vemos que el mineral circón está compuesto de tetraedros aislados (**1T**), mientras que los piroxenos por cadenas simples de un número infinito de miembros (**nT**). En particular, las redes de tetraedros que se extienden a lo largo y a lo ancho, formando hojas completas, constituyen el grupo de filosilicatos, o estructuras laminares, del que forman parte las arcillas.

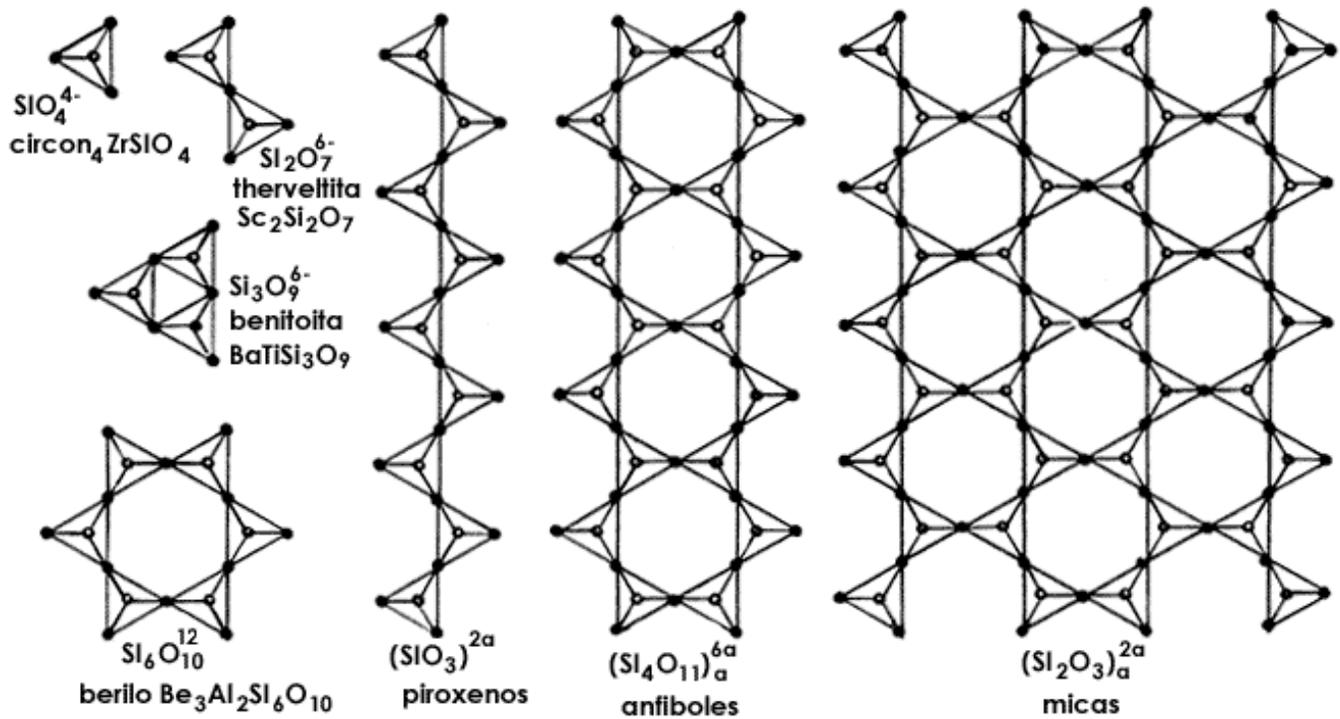


Figura 5(a). La estructura de los silicatos, o el mecano

Una propiedad extraordinaria de estas estructuras es su posibilidad de ser capaces de sustituir al átomo de silicio (**Si**), situado en el centro de los tetraedros (Figura 4), por otro de menor carga como el aluminio (**Al³⁺**), generando así una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo **Na**, **K**, **Ca**, ... , etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas. Esto es un ejemplo típico de lo que ocurre a menudo en la química, es decir, que los arreglos cristalinos, las sustituciones, etc., representan aspectos físicos, que ocurren a escala molecular, estableciendo o modificando las propiedades químicas de los materiales: fundamento de las propiedades químicas de las sustancias es la física que ocurre a escala molecular.

LA ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS: ¡QUIÉN ES QUIÉN!

Hemos visto cómo la unión de varios tetraedros nos genera hojas que se extienden a lo largo y a lo ancho, dando origen a las estructuras laminares. Veamos de cerca qué ocurre al unir los vértices para formar anillos tipo **6T** (seis tetraedros), como se muestra en la figura 5 (b). Las puntas de los tetraedros se encuentran a la misma altura, formando un plano, de igual manera ocurre con los átomos de silicio situados en el centro de los tetraedros y con los de oxígeno situados en las bases. La articulación de esos tres planos nos conduce pues a la formación de una *hoja tetraédrica* (tipo T).

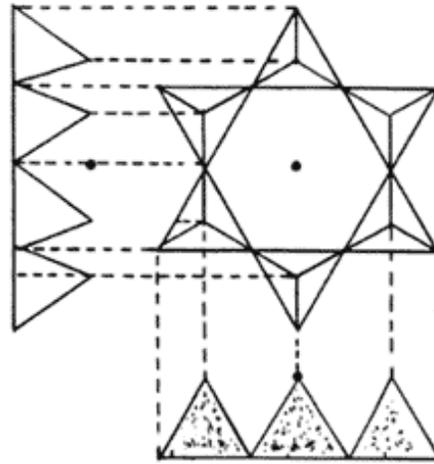
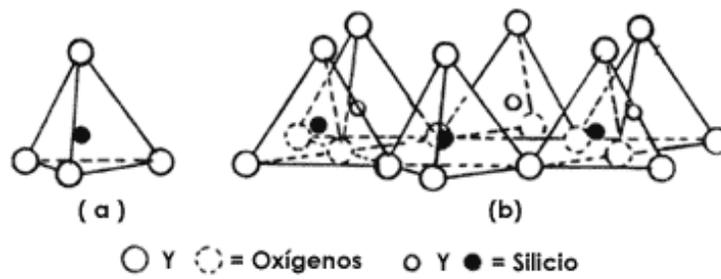


Figura 5 (b). El anillo de seis tetraedros.

Siguiendo esta secuencia, podemos ahora unir dos hojas para formar una *lámina tetraédrica*, tal y como se ilustra en la figura 6. En ésta se observa que las dos hojas se encuentran invertidas, una con respecto a la otra, compartiendo uno de los vértices.

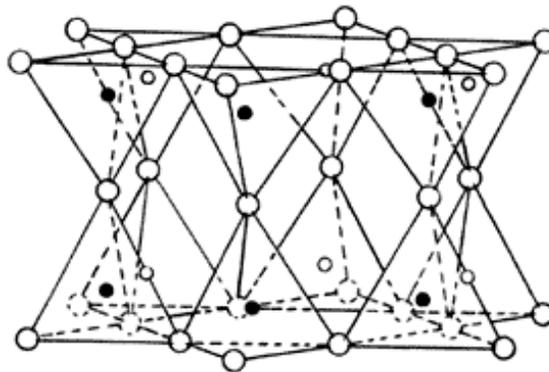


Figura 6. Una lámina de tetraedros (T).

Similarmente, existen otros cuerpos poligonales que podemos unir entre sí para formar cadenas, tal y como ocurre con el octaedro (octa, ocho; edros, cara), representado en la figura 7, formación típica de los compuestos de aluminio, por ejemplo $\text{Al}(\text{OH})_6$, o del magnesio. Este arreglo es una *hoja octaédrica* (tipo O).

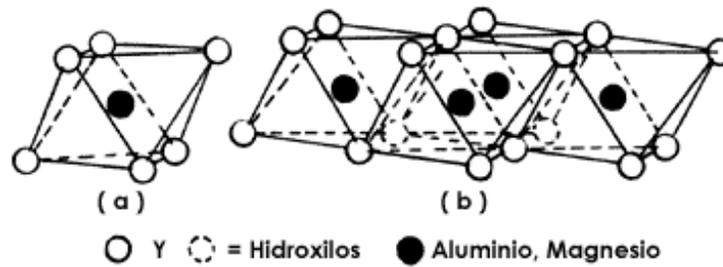


Figura 7. Una hoja de octaedros (O).

Ahora bien, la unión de una hoja del tipo **T**, con otra del tipo **O**, genera una *lámina T-O*, o *lámina 1:1*, tal y como se ilustra en la figura 8. La coincidencia, sin embargo, no es perfecta cuando se trata de hojas T formadas por silicio-oxígeno y de hojas tipo **O** formadas por aluminio-oxígeno-oxhidrilo, lo cual crea un efecto de esfuerzo entre las hojas que es de gran importancia para algunas de las aplicaciones de las arcillas que presentan este tipo de láminas (**T-O**), por ejemplo el caolín.

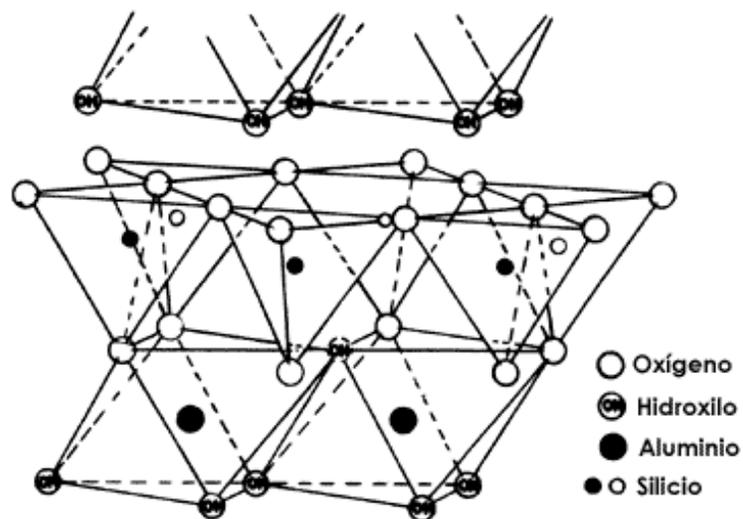


Figura 8. Una lámina T-O.

Ahora terminamos la secuencia agregando una tercera hoja tipo **T** a la lámina **T-O** mencionada arriba y el resultado se ilustra en la figura 9, que muestra la lámina **T-O-T**, o, como algunos lectores perspicaces la llaman: *la estructura de sandwich*, debido a que dos hojas tipo **T** se asemejan a los panes del sandwich, mientras que el jamón correspondería a la hoja tipo **O**. Esta lámina tiene pues dos hojas **T** y una hoja **O**, o sea la lámina es del tipo 2:1.

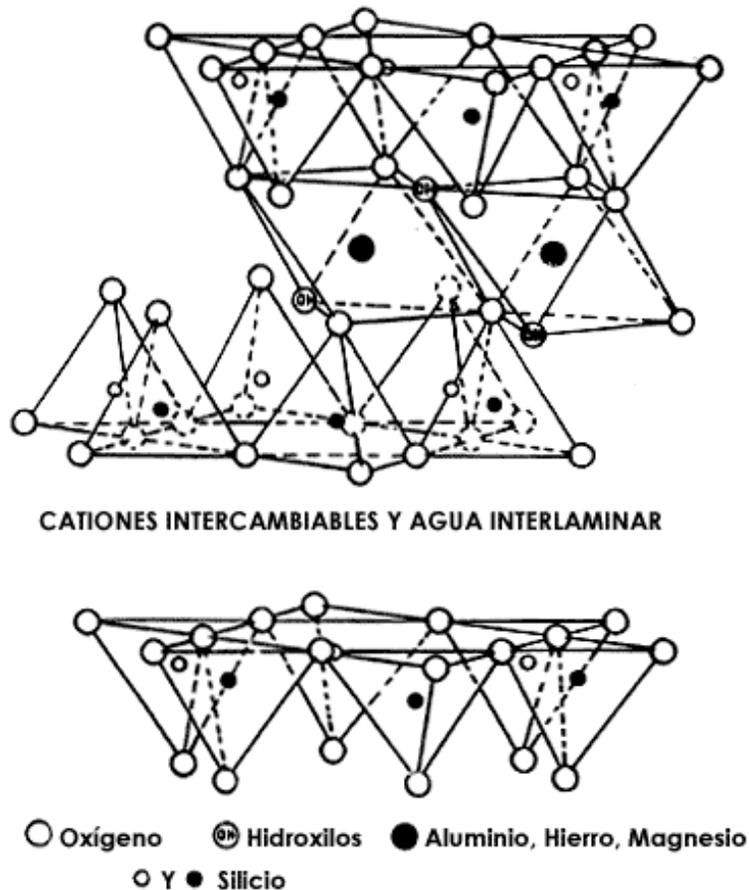


Figura 9. Una lámina T-O-T.

Hasta aquí termina el juego del mecano, ya que la lámina **T-O-T** es la más completa y no acepta una nueva adición, debido a la saturación de los enlaces. Una cosa es clara en este punto: las estructuras de sandwich son nada menos que ¡la parte esencial de las arcillas! Por si hubiese alguna duda al respecto, pasaremos ahora a ilustrar la importancia de las estructuras formadas por las láminas tipo 1:1 y aquellas formadas por las láminas tipo 2:1.

GRUPO 1:1

Los caolines

El nombre caolín proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región situada al norte de China de donde se extraía esta arcilla desde el siglo VIII d.C., para la fabricación de la porcelana. La unidad fundamental de la estructura del caolín es la lámina **T-O**, o sea la lámina 1:1, una hoja de tetraedros de silicio-oxígeno unida a otra hoja de octaedros de aluminio-oxígeno-OH. La sustitución del silicio por otro elemento, como el aluminio, o bien la sustitución del aluminio en la hoja tipo **O** por otro elemento de menor carga, por ejemplo el magnesio, causa un cambio químico en el material pero mantiene esencialmente la misma estructura. Estas sustituciones dan origen a la familia de los caolines (Figura 10).

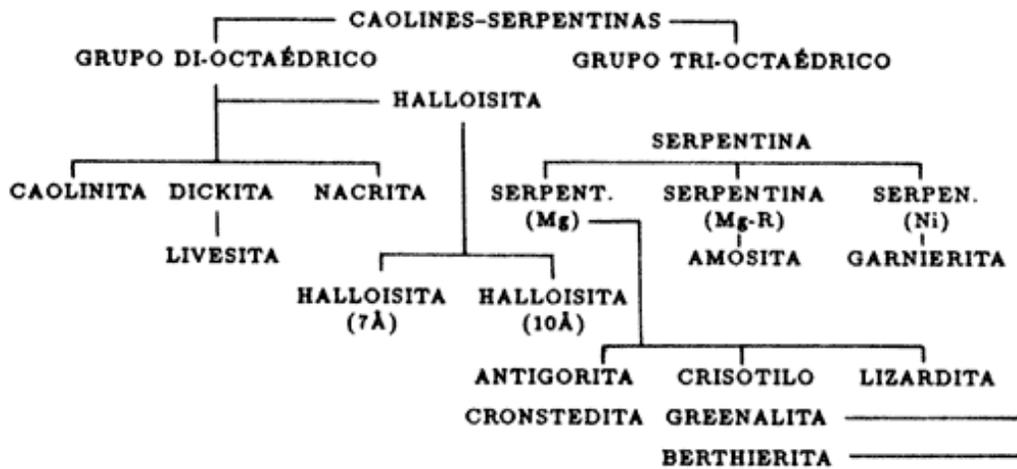
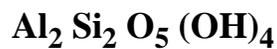


Figura 10. El árbol de los caolines.

La primera rama comprende a aquellos minerales derivados de la caolinita que guardan la misma composición química por cada unidad estructural:



éstos son la nacrita, dickita, anauxita, halloisita y el alofano, los cuales difieren entre si sólo por su arreglo laminar. Imaginemos un paquete de naipes en el que todas las cartas se encuentran ordenadas perfectamente: ésta es la estructura de la nacrita (Figura 11). En este caso el paquete de cartas puede llegar a ser muy alto debido a que la estructura ordenada es más estable.

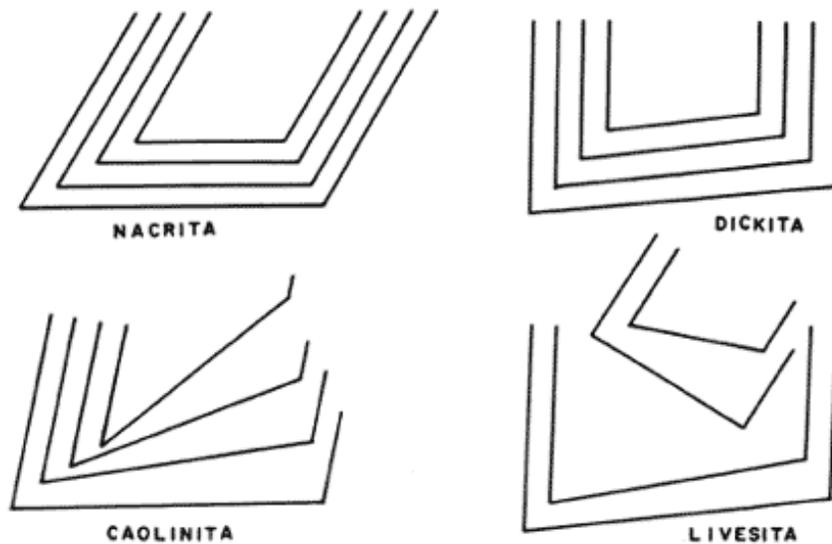


Figura 11. La baraja de los caolines.

En cambio, la dickita está dispuesta de tal manera que el paquete de naipes se abre más de un lado que del otro, entre 6 y 7 grados, mientras que la caolinita se abre hasta 15 grados.

Existe un mineral asociado (livesita) que presenta una abertura a un lado que es siempre regular, mientras que la carta siguiente se abre de forma irregular hacia el otro lado, dando origen a una estructura laminar muy desordenada y poco estable.

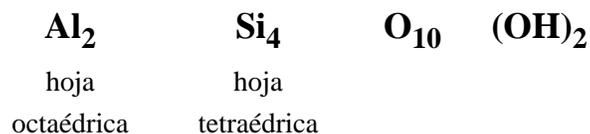
El otro grupo de caolines es igualmente importante y comprende el mismo tipo de estructura laminar, pero con una sustitución del aluminio de la hoja tipo **O** por otro catión, por ejemplo el hierro (**Fe²⁺**, **Fe³⁺**) o el magnesio (**Mg²⁺**). Sin embargo, al sustituir el aluminio por el magnesio se contraen ligeramente las dimensiones de la hoja tipo **O**, originando una pequeña distorsión en la lámina **T-O**, la cual permite acomodar el esfuerzo pero ocasiona que la forma externa de los cristales de este tipo sea fibrosa o corrugada, tal es el caso de los asbestos (crisotilo) y la antigorita, respectivamente.

Una última observación: en las estructuras de estos derivados del caolín se ve que sus hojas se ensamblan naturalmente unas sobre otras, como las cartas de una baraja, con las variaciones mencionadas arriba, de modo que entre una hoja y otra hay un enlace muy débil, del tipo Van Der Waals, creando un espacio interlaminar que guarda propiedades muy interesantes, como veremos más adelante.

GRUPO 2:1

1) Las esmectitas

La familia de las esmectitas está formada por todas aquellas arcillas que presentan una estructura de ¡sandwich!, es decir, que está constituida por dos hojas de tipo **T** y por otra intermedia de tipo **O**. La fórmula estructural típica de estas arcillas es la siguiente:



Esta estructura es eléctricamente neutra debido a que todas las posiciones en la hoja **T** se encuentran ocupadas por átomos de silicio, mientras, que todas las posiciones de la capa **O** contienen aluminio. Ésta es la fórmula típica de la pirofilita. Sin embargo, tal y como se muestra en la figura 12, existen numerosas ramas en el árbol de las arcillas, las cuales presentan la misma estructura de sandwich, excepto que algunas veces el aluminio sustituye al silicio parcialmente en la capa **T**, o bien el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa **O**, e inclusive el flúor (**F**) pudiera sustituir al oxígeno de la capa **O**. Luego, estas diferencias de composición química hacen que las propiedades de cada arcilla mineral sean distintas.

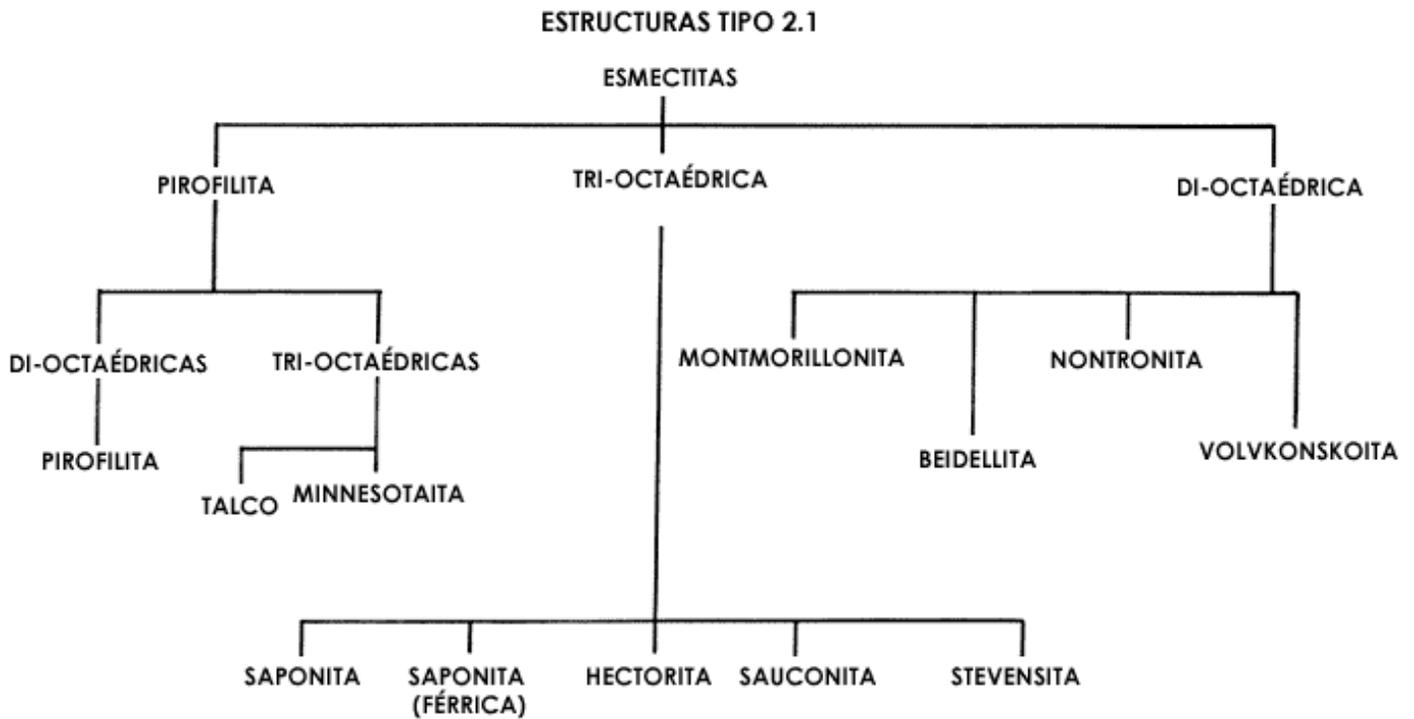
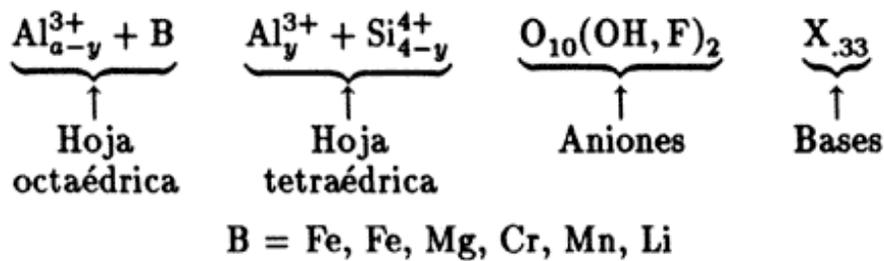


Figura 12. El árbol de las esmectitas.

Entre todas las esmectitas, la rama de las arcillas di-octaédricas presenta propiedades muy interesantes, derivadas por supuesto de su estructura laminar, de su espacio interlaminar y de la carga residual. La figura 13 ilustra la composición de las láminas **T-O-T** para todas las arcillas del tipo esmectita, es decir, las láminas tipo 2:1. Entre ellas destaca la montmorillonita, cuyo nombre se deriva del francés Montmorillon, lugar de Francia en que se encontró esta arcilla típica en 1874. La composición química de una arcilla esmectita, tipo montmorillonita, es la siguiente:



Como se observa en esta fórmula estructural, la hoja tetraédrica está compuesta sólo de silicio y aluminio mientras que la hoja octaédrica contiene aluminio y una variedad de cationes (**B**). Esto ilustra perfectamente la gran variedad de arcillas tipo esmectita que se pueden conseguir simplemente cambiando el catión de la hoja octaédrica y manteniendo ocupada la hoja **T** con **Si** y **Al** (Figura 13), para cada caso. Por supuesto, la sustitución de aluminio (**O**) y silicio (**T**) por un catión de menor carga eléctrica, por ejemplo **Mg**, origina una deficiencia de carga eléctrica que es responsable de algunas de las propiedades superficiales más importantes de las arcillas: la capacidad de intercambio, la absorción de moléculas polares como el agua, así como de otros compuestos orgánicos, por ejemplo las aminas, las cuales al introducirse en el espacio interlaminar causan el hinchamiento de la estructura laminar de las arcillas.

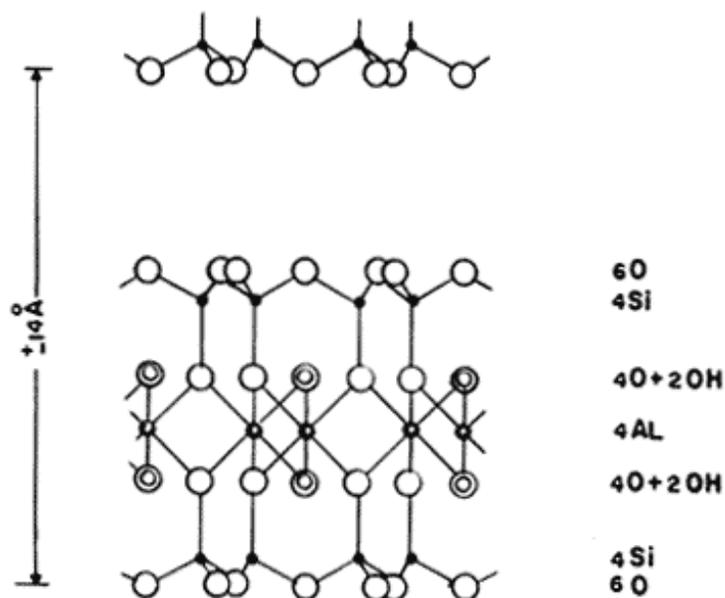


Figura 13. La composición de la lámina de T-O-T.

Debido a su afección por el agua y las moléculas orgánicas las montmorillonitas encuentran aplicaciones muy variadas que van desde la extracción de esencias naturales hasta la fabricación de catalizadores para procesar los hidrocarburos derivados del petróleo. Los mecanismos que intervienen a escala molecular para llevar a cabo estas reacciones serán explicados en los capítulos siguientes, por ahora sólo mencionaremos que: la estructura de sandwich! y el grado de sustitución catiónica determinan en gran medida las propiedades de las arcillas.

Más aún, la sustitución de cationes se lleva a cabo mediante mecanismos muy sencillos. La figura 14 muestra la fórmula estructural de las arcillas tipo esmectita, en donde podemos apreciar las sustituciones que se realizan en las hojas de cada uno de los minerales.

<i>Mineral</i>	<i>Carga</i>	<i>Composición</i> (octa) (tetra) O ₁₀ (OH) ₂
Pirofilita	(E = 0)	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Talco	"	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Minnesotaita	"	(Fe, Mg) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Saponita	(E ⁺ = 0.33)	Mg ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Saponita férrica	"	(Fe ²⁺ , Mg) ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Hectorita	"	(Mg _{2.6} , Li _{.33}) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Sauconita	"	(Mg, Zn) ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Stevensita	(2E ⁺ = 2x)	Mg _{3-x} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂

Montmorillonita	($E^+ = 0.33$)	$(Al_{1.67}, Mg_{.33}) Si_4 O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Beidellita	"	$Al_2 (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Nontronita	"	$Fe_2^{3+} (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Volkonskoita	"	$(Al, Fe^{3+}, Cr)_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2 nH_2O$

Figura 14. Arcillas esmectitas del grupo 2:1. Fórmula química.

Existe otra familia de arcillas que se asemeja a la de las montmorillonitas: las vermiculitas, que tienen la misma estructura de sandwich, pero que pueden presentar un grado de sustitución mayor en la hoja octaédrica, originando una carga residual mayor que las montmorillonitas y, por eso mismo, la atracción entre las láminas es mayor también, por lo que la estructura no es tan expansible.

2) Las micas

Las micas son los minerales clasificados como arcillas que tienen la misma estructura que las esmectitas, excepto que el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo el potasio, hacen que la carga residual sea muy alta. En estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible, ni sus cationes interlaminares intercambiables. La familia de las micas se ilustra en la figura 15 y la fórmula estructural en la figura 16.

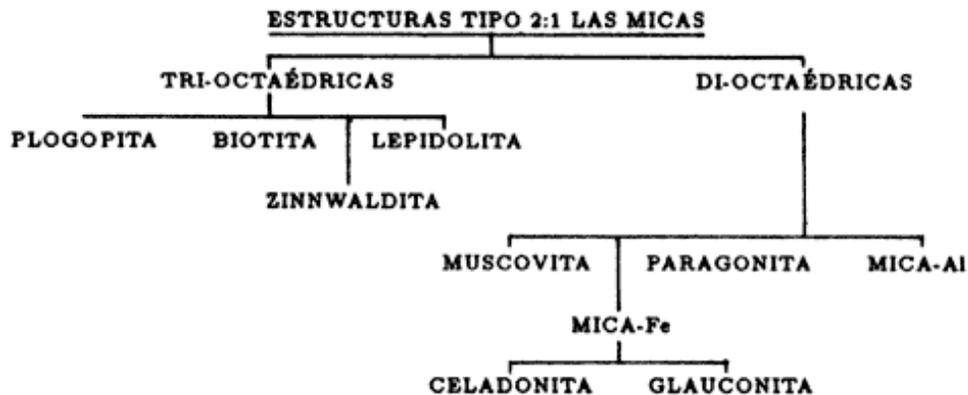


Figura 15. El árbol de las micas.

<i>Mineral</i>	<i>Carga</i>	<i>Fórmula</i>
Plogopita	($E^+ = 1$)	$KMg_3 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Biotita	"	$K (Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn)_3 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$

Lepidolita	"	$K (Al, Li)_3 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2$
Sinnwaldita	"	$K (Al, Li, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2$
Muscovita	"	$KAl_2 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Paragonita	"	$NaAl_2 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Mica-Al	($E^+ = 1$)	$K_x (Al, Mg)_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2 NH_2O$
Mica-Fe	($E^+ = 1$)	$KMgFe^{3+}Si_4 O_{10} (OH)_2$
Celadonita		
Mica-Fe (Glaucionita)		$K (R_{1.3}^{3+} R_{.67}^{2+}) (Si_{3.6} Al_{.33}) O_{10} (OH)_2$

Figura 16. Micas, fórmula química y formas estructurales.

El lector recordará la facilidad con la que la mica común se parte a lo largo de las hojas que la componen, pero, ¿qué difícil es partirla en la dirección perpendicular! ¿no es así? Esto ilustra perfectamente la constitución laminar de tales minerales. Además, conociendo la estructura podemos explicarnos fácilmente por qué las micas son buenos aislantes térmicos, por ejemplo en las planchas eléctricas y en las conexiones: debido al espacio interlaminar, el cual no es un buen conductor térmico o eléctrico (las hojas se encuentran "desconectadas" unas de otras, lo que impide el paso del fluido térmico o eléctrico).

En contraste con la montmorillonita, la cual tiene una deficiencia de carga localizada en el centro de los octaedros, la carga residual de las micas está localizada en la hoja tetraédrica, es decir, en la superficie misma de las hojas, originando un amarre fuerte de los cationes interlaminares con las hojas, por lo que la estructura no es fácilmente expansible. Entre las micas más conocidas se encuentran la muscovita, cuyo nombre deriva del "vidrio de Moscú", con el que se fabricaban antiguamente las ventanas de las casas de esa ciudad.

En resumen, las arcillas expansibles son las esmectitas, las vermiculitas y las haloisitas, que derivan esta propiedad de la concentración de carga interlaminar, por ejemplo de 0.33 unidades por cada celda unitaria, mientras que ésta es igual a 0.86 en las vermiculitas y 1.0 en las muscovitas.

La figura 17 muestra los distintos espesores que se obtienen con las distintas arcillas al intercalarse una o dos capas de agua en el espacio interlaminar:

a) Pirofilita	· cationes octaédricos
b) Mica	o cationes intercambiables
c) Esmectita	w capas de moléculas
d) Vermiculita	
e) Clorita	· OH
f) Caolinita-serpentina	K ion de potasio
g) Haloisita (10A)	

Una cosa queda clara: los edificios moleculares que constituyen a las arcillas y el grado de sustitución logrado, permiten obtener una serie de propiedades de interés en diversos campos de aplicación. No sólo esto es cierto cuando interviene la mano del hombre al tratar de modificar el espacio interlaminar (Figura 17), sino que el proceso

de modificación a través del intercambio con otras especies químicas ocurre naturalmente, lo que conduce a una variación constante de la naturaleza de la arcilla que se traduce en variaciones de la fertilidad del suelo, permeabilidad, etc. Estas modificaciones del edificio molecular son susceptibles de estudiarse experimentalmente en el laboratorio y para ello es necesario introducir, ya sea un catión, ya sea una especie química distinta, en el interior del espacio interlaminaar, lo cual será el tema que abordaremos enseguida.

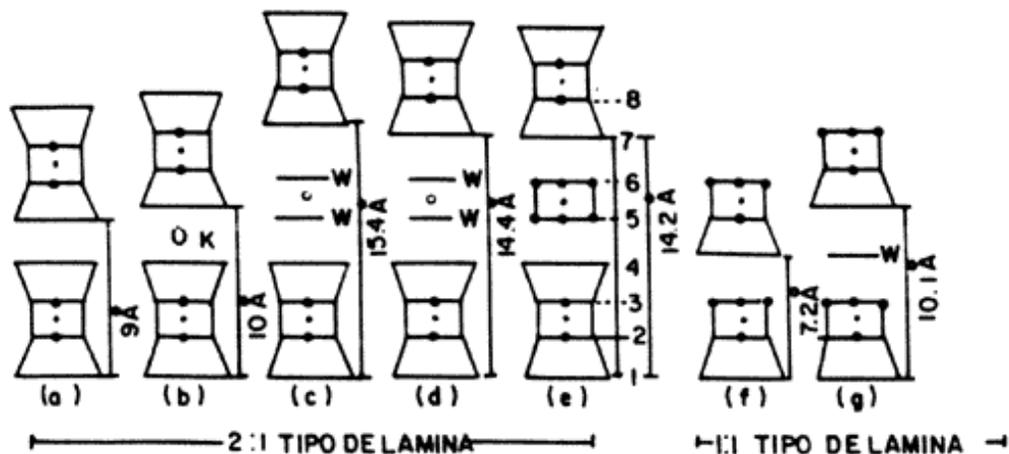


Figura 17. El espesor de las arcillas expandidas.

Inicio



II. RECONSTRUYENDO LA NATURALEZA: LA INGENIERÍA MOLECULAR

EL INTERÉS científico que despiertan los materiales laminares, como las arcillas, se debe principalmente a sus propiedades físico-químicas, las cuales son únicas entre los minerales naturales. Asimismo, sus aplicaciones, tan diversas, provienen de ese mismo conjunto de propiedades, las cuales convierten a la arcilla natural en un material muy versátil.

Entre las características principales podemos citar las siguientes: a) las arcillas están formadas por cristales muy pequeños, b) tienen la capacidad de intercambiar iones, c) son capaces de variar su composición química interna, d) pueden alojar moléculas en el interior de su espacio interlaminar, e) la superficie de las láminas presenta una actividad química considerable y f) los cambios físicos de la estructura laminar, por ejemplo el hinchamiento, son reversibles.

Numerosas son las bondades de estos sólidos, producto de las modificaciones que sufre el edificio laminar al ponerse en contacto con otras especies químicas o al someterse a condiciones termodinámicas específicas, lo que constituirá el tema de este capítulo. El lector posee ya una descripción de la arquitectura de los edificios laminares típicos de las arcillas, así como de las especies o "muebles" que intervienen en los fenómenos relacionados con ellas, por lo que ahora lo invitamos a hacer un cambio en la decoración.

Desde la antigüedad, el hombre ha practicado actividades diversas de las que desconocía, por supuesto, los fundamentos científicos que se relacionan con aquellas. De hecho, hoy en día no tenemos una descripción satisfactoria de todos ellos, sin embargo, esto no fue impedimento para que, empíricamente, se haya llegado a realizar una serie de desarrollos, que pueden calificarse de fantásticos, propios de un conocimiento avanzado a escala molecular. Las espadas de Damasco y las porcelanas chinas del periodo Sung son buenos ejemplos. Baste mencionar que los chinos, en los siglos IX al XII, obtuvieron materiales cerámicos de gran dureza al mezclar las arcillas con sustancias orgánicas. Esta operación permitió fabricar la porcelana de finísimo grosor que asombró a los europeos de épocas posteriores.

Sin embargo, con propósitos más prácticos y menos estéticos hoy en día millones de toneladas de arcilla, de la familia de las esmectitas, se utilizan durante la perforación de los pozos petroleros con el fin de impartir la viscosidad apropiada a los lodos de perforación. En estas aplicaciones tan disímolas existe un factor común que es la modificación de la estructura laminar de la arcilla al ponerse en contacto con especies químicas, por ejemplo el agua y las moléculas orgánicas. Esta situación puede simularse si, con imaginarios obuses químicos, nos disponemos a bombardear el edificio laminar de las arcillas provocando cambios que pueden o no ser permanentes. En nuestro arsenal contamos con tres tipos de obuses: el agua, las moléculas orgánicas y los polímeros inorgánicos de tamaño variable.

A) EL OBÚS DE AGUA

Imaginemos que lanzamos un proyectil sobre el edificio laminar de una arcilla, por ejemplo de agua, de modo que al chocar se produzca una interacción explosiva, en donde la carga estaría representada por la fuerza electrostática. Esta fuerza es resultado del carácter dipolar de la molécula de agua, es decir, que ésta se comporta como un pequeño imán, ya que se halla compuesta por un átomo de oxígeno (O^{2-}) y dos de hidrógeno (H^+); como los hidrógenos se localizan en un extremo de la molécula, aparece a un lado una concentración de carga positiva, mientras que en el otro es más negativa.

Por eso los proyectiles se asocian de inmediato a la superficie de las láminas de arcilla, las cuales también presentan una carga neta negativa. En particular, a cierta temperatura, por ejemplo $0^{\circ}C$, las moléculas de agua se asocian fácilmente a las superficies y también unas con otras, logrando una densidad y una viscosidad aún mayores que la densidad del agua en estado natural, a semejanza del hielo, y extendiéndose en varias capas.

También por estas razones, al añadir una pequeña proporción de arcilla al agua ésta permanece flotando sobre el líquido indefinidamente, alcanzando el estado coloidal. Sin embargo, si se añade aún más, el líquido se torna viscoso y se resiste a fluir; en cambio, si se agita vigorosamente la suspensión, el líquido recupera su fluidez, perdiéndola nuevamente al cesar la agitación. A esta propiedad se le llama tixotropía, y es típica de muchas de las arcillas comunes. Tiene su asiento en la afinidad por el agua, así como en la capacidad de hinchamiento del espacio

interlaminar, el cual puede alcanzar hasta quince veces el volumen original.

Veamos ahora en forma secuencial lo que ocurre cuando el agua se aproxima al edificio laminar de la arcilla con ayuda de la figura 18.

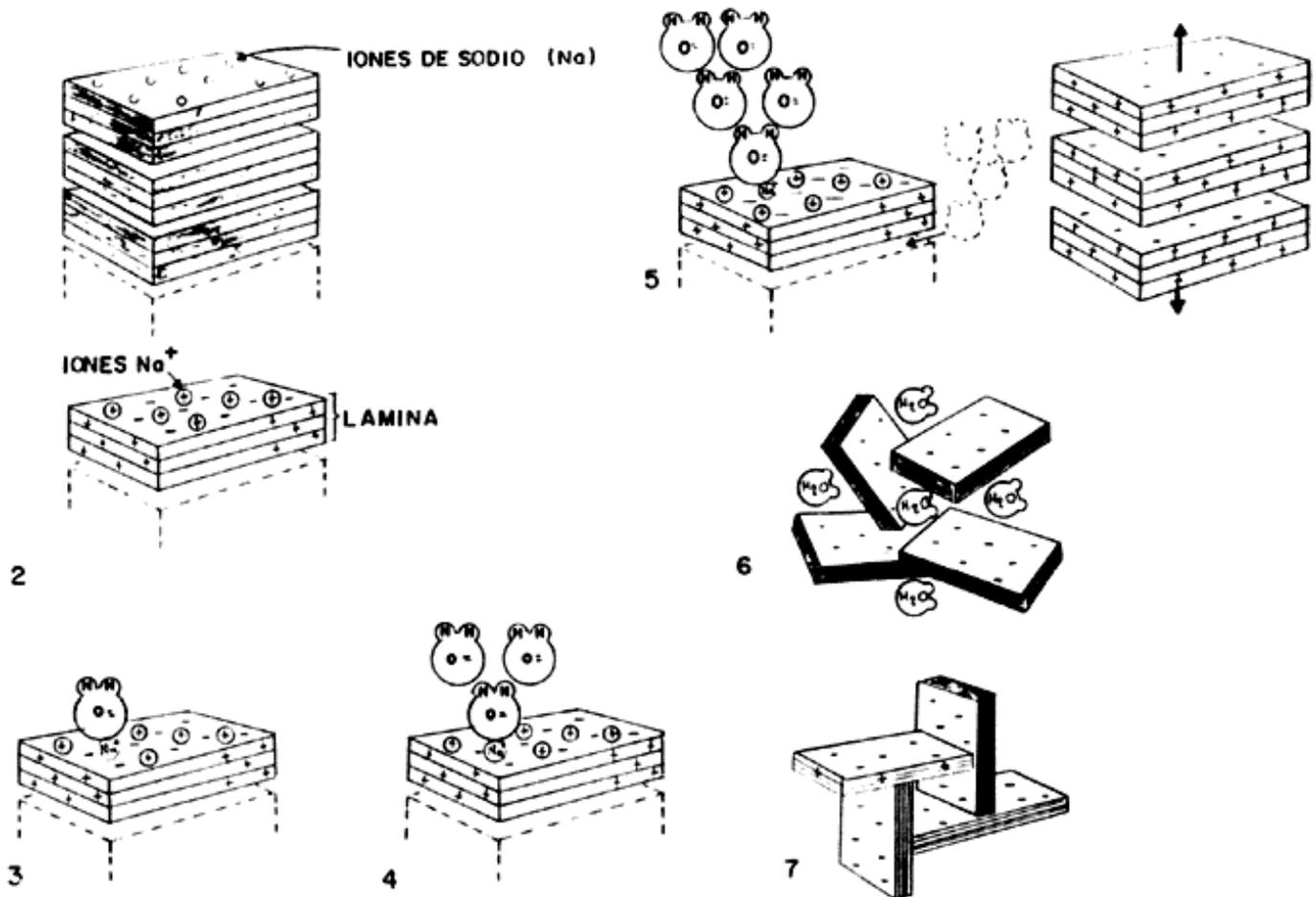


Figura 18. Etapas secuenciales en la interacción del agua en la arcilla.

Etapa 1: en el principio la arcilla se encuentra en un estado deshidratado, son algunos iones de sodio (Na^+), potasio (K^+) o tal vez calcio (Ca^{2+}) adsorbidos en el espacio interlaminar.

Etapa 2: desde el punto de vista electrostático, las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las laminillas, mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Luego los iones de sodio tienden a concentrarse sobre las caras planas.

Etapa 3: al ponerse en contacto con la arcilla, las moléculas de agua son atraídas fuertemente hacia las superficies planas debido a la presencia de los iones sodio cargados positivamente. Hay que recordar que, a la escala molecular, las fuerzas electrostáticas son las más importantes.

Etapa 4: en este estado, las moléculas de agua se hacen más dipolares, atrayendo a otras de su especie.

Etapa 5: la carga negativa en la superficie de las laminillas se incrementa conforme las moléculas de agua se

enlazan unas con otras al aumentar su polarización. Llega un momento en que la carga superficial es tal, que las láminas se repelen entre sí separándose unas de otras por lo que el espacio interlaminar se expande, originando el hinchamiento característico de las arcillas.

Etapa 6: las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlaminar, neutralizando parcialmente las superficies expuestas y manteniendo las láminas apartadas unas de otras, hasta que el agua es eliminada mediante algún procedimiento de secado, lo cual origina una contracción del volumen de la hojuela.

Etapa 7: el equilibrio de la hidratación es alcanzado cuando termina la mezcla de la arcilla con el agua, dando como resultado una estructura interna hidratada que hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente, de modo que se forma una estructura de *castillo de naipes*, por lo que las moléculas de agua entran y salen libremente. Este castillo puede derrumbarse mediante una agitación vigorosa de la suspensión, pero tiende a formarse de nuevo si la agitación termina, esto es, si el medio queda libre de esfuerzos mecánicos. Este último efecto se debe a que las hojas mantienen la fuerte carga electrostática que las atrae.

Conociendo el lector estos mecanismos de interacción arcilla-agua, seguramente viene la pregunta: ¿qué provecho práctico se puede obtener de ello?, por lo que mencionaremos un par de ejemplos a fin de mostrar su valor.

LAS ARCILLAS Y LA AGRICULTURA

Se puede decir que casi todos los suelos contienen arcilla en mayor o menor proporción. Hoy en día se sigue estudiando la correlación que existe entre la cantidad y la clase de arcilla en los terrenos y su relación con la fertilidad. Los científicos en este campo, como sucede a menudo en otras ramas de la ciencia, se quejan de que en la actualidad no se conoce en su totalidad el proceso y proponen la necesidad de estudiar *in situ* las propiedades de las arcillas, el efecto de las mezclas y las modificaciones que éstas provocan. Es necesario decir que los modelos de laboratorio muchas veces no reflejan las observaciones realizadas en el terreno, por lo que deben llevarse a cabo en condiciones más próximas al fenómeno natural.

Como se ha mencionado, la presencia de arcillas y un conjunto de factores como la acidez, el tipo de cationes, la humedad, etc., producen efectos benéficos y dañinos en los suelos agrícolas. Se ha llegado a determinar que la composición óptima de arcilla oscila entre un 15 y 25% en peso de componentes finos, con diámetros de partícula menores a 2 micras, y una proporción mayor de componentes gruesos con un diámetro de partícula mayor a 60 micras. Esto se debe a que una de las principales funciones de las arcillas es su contribución a la estabilidad y cohesión de los suelos para resistir los efectos mecánicos nocivos como la lluvia y el viento. La habilidad de las arcillas para hincharse o contraerse en respuesta al grado de humedad es vital en la generación de la estructura granular de los suelos agrícolas, los cuales requieren de permeabilidad adecuada del aire y del agua, y también que no dificulten la penetración a las raíces de las plantas.

Estudios recientes realizados mediante la microscopía electrónica, revelaron que a nivel submicroscópico existen en los suelos partículas con una configuración y jerarquía particulares, las cuales varían en un intervalo muy amplio, comenzando con las fisuras comunes de 10 a 100 milímetros de tamaño y terminando con los microporos de 10 a 100 angstroms (1 angstrom = 0.000000001 m).

Sumando a lo anterior la capacidad de intercambio iónico típica de las arcillas, la cual ejerce un efecto directo sobre el almacenamiento y la cualidad de ceder nutrientes minerales como magnesio, sodio, potasio, calcio y los compuestos nitrogenados y fosfatados, llegamos a un punto realmente vital en el papel tan importante que desarrollan las arcillas en el crecimiento de las plantas y de los animales que se alimentan de ellas. También es un hecho experimental que, bajo condiciones de acidez adecuadas, los iones de hidrógeno (H^+) reaccionan con las láminas de arcilla, disolviendo el magnesio, el hierro y el aluminio asociados comúnmente a la hoja octaédrica de las arcillas. Pero, en los terrenos que poseen altas concentraciones de aluminio intercambiable, la extracción de aluminio realizada por la vía ácida suele ser nociva para el crecimiento de las plantas. En cualquier caso, la interacción de la arcilla con el agua y el medio mineral circundante es determinante para el desarrollo de los suelos agrícolas.

LAS ARCILLAS Y... LA PÍLDORA

La gran capacidad que para hincharse tienen las arcillas puede utilizarse positivamente. En efecto, al hincharse las hojuelas por efecto de la hidratación se producen esfuerzos considerables que vencen la atracción electrostática entre las láminas, y el concurso de todas estas fuerzas sobre una masa de arcilla que equivale apenas a unos cuantos

miligramos es tal que fácilmente pueden desintegrar un aglomerado, o bien ¡una pastilla! Así tenemos, pues, una aplicación concreta aprovechada frecuentemente en la fórmula de numerosas pastillas de uso farmacéutico y veterinario. Debido a que las fuerzas que se generan durante la expansión del material son importantes a escala microscópica, éstas conducen a la desintegración de las pastillas, que contienen arcilla en su composición, al contacto con los jugos gástricos, liberando los componentes activos en el organismo del paciente. ¡Cuántas aspirinas habremos tomado sin enterarnos de que el agente aglutinante de la pastilla era una arcilla mineral!

También el uso de estas fórmulas se ha extendido al campo de la preparación de insecticidas y herbicidas que pueden liberarse en los suelos de manera controlada al ser humedecidos.

De toda esta historia del obús de agua vale la pena retener algunos puntos importantes: las arcillas que no presentan carga residual negativa carecen de las propiedades de hinchamiento descritas anteriormente, tal es el caso del talco y la pirofilita. Por otra parte, los minerales, como la mica muscovita, sí presentan carga residual negativa, pero ésta es muy elevada, de modo que tampoco expanden su estructura laminar al ponerse en contacto con el agua. La explicación de unas y otras está, pues, en el valor de su carga negativa: si es nula ($E = 0$) o muy elevada ($E = 1.0$) no se produce el fenómeno de hinchamiento. En el caso de las micas, la carga laminar asociada a cada unidad estructural es tan fuerte que las láminas atrapan los cationes positivos como el potasio, de manera que el agua, a pesar de su dipolo, no puede romper ese enlace.

En el caso intermedio se encuentran las arcillas tipo montmorillonita y algunas tipo vermiculita, las cuales se expanden rápidamente en presencia de un gran volumen de agua. Más aún, si hacemos un experimento cuidadoso, como el que se muestra en la figura 19, en la que observamos la separación laminar que sufre una bentonita sódica al ponerse en contacto con concentraciones crecientes de agua, veremos que se presenta una serie de escalones, cada uno de los cuales indica la formación de una primera capa de moléculas de agua en el espacio interlaminar, una segunda capa y una tercera, respectivamente, señalando que el edificio laminar se expande ordenadamente al ser bombardeado por el obús de agua.

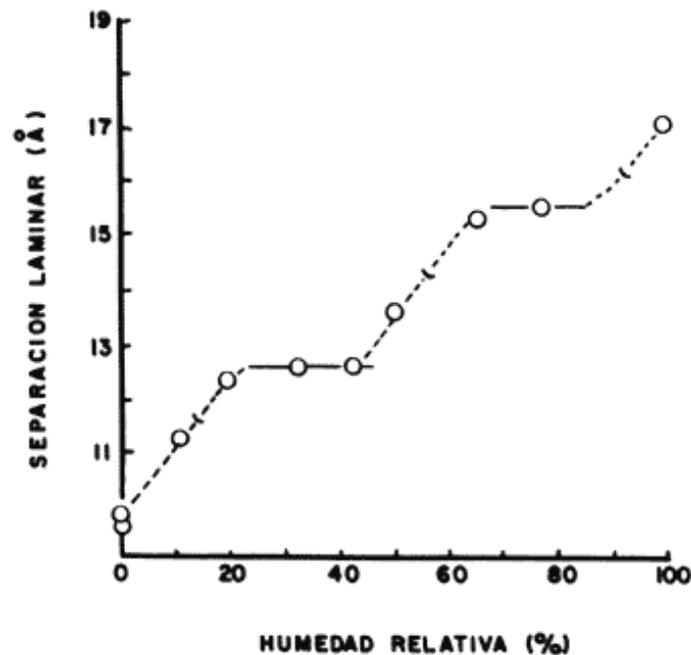


Figura 19. Expansión de la arcilla con el contenido de agua.

Al igual que las moléculas de agua, las especies orgánicas también penetran en el espacio interlaminar de las arcillas. El arsenal en este caso es más abundante ya que las especies orgánicas forman un grupo muy prolijo, variando tanto su tamaño como sus grupos funcionales, hasta llegar a las moléculas complejas características de las proteínas y los aminoácidos. Los cambios de propiedades que pueden producirse por la intercalación de especies orgánicas en el espacio interlaminar son muchos y muy variados, de ahí que despierten gran interés, desde el punto de vista científico y el de sus aplicaciones. Por ejemplo, las propiedades tixotrópicas mejoran al tratar la arcilla con compuestos orgánicos, que dan origen a fórmulas diversas de pinturas o de cosméticos. La intercalación de especies orgánicas como los alcoholes, las proteínas y los hidrocarburos en el espacio interlaminar se realiza de manera muy fácil, expandiendo la estructura laminar y creando así una porosidad interna en el material, con lo cual la arcilla se convierte en una verdadera *esponja molecular*.

Enseguida veremos cómo el estudio de estos fenómenos nos puede conducir al control de la porosidad y otras propiedades a escala molecular, de modo que puedan lograrse aplicaciones interesantes. Tal vez uno de los sistemas más estudiados es el compuesto por la arcilla y los derivados orgánicos del amonio, fenómeno descubierto en 1934. A partir de entonces se inició una búsqueda febril en varios laboratorios del mundo con el fin de identificar nuevos compuestos de ese tipo y las propiedades logradas mediante la intercalación de una gama de compuestos arcilla-orgánicos. Treinta años después se había informado de ¡más de 9 000 compuestos!

Se ha descubierto que las moléculas orgánicas se acomodan entre las láminas de la arcilla produciendo un efecto de expansión que varía según dos factores principales:

— el tamaño de la cadena orgánica, o el número de átomos de carbono.

— la carga eléctrica de las láminas.

Por ejemplo, a partir de una estructura como la esmectita sódica, cuyo espacio interlaminar se encuentra colapsado en el estado anhidro (sin humedad). Es decir, que si la separación inicial entre los centros de las dos láminas contiguas es de 9.5 Angstroms aproximadamente, entonces habrá una modificación de la distancia interlaminar al intercalar moléculas orgánicas de la siguiente manera:

<i>Molécula</i>	<i>Separación interlaminar (en Angstroms)</i>
$(\text{CH}_3)_3 \text{NH}_3^+$	12.0
$(\text{CH}_3)_2 \text{NH}_2^+$	12.2
$(\text{CH}_3) \text{NH}^+$	13.0
$(\text{CH}_3)_4 \text{N}^+$	13.5

LA EXPANSIÓN CONTROLADA

El efecto de la otra variable, es decir la carga eléctrica de las láminas, se ilustra en la figura 20, la cual muestra la expansión del edificio laminar de una arcilla al intercalarse una molécula orgánica que contiene doce átomos de carbono. La posición de la molécula varía según la carga laminar de la arcilla. Así, cuando la carga es baja la molécula orgánica se acomoda con sus partes planas dispuestas paralelamente a las láminas de la estructura, mientras que si se incrementa la densidad de carga entonces la cadena comienza a levantarse hasta llegar al caso extremo en que se coloca perpendicularmente a las láminas. Esta última situación es idónea en lo que a estabilidad se refiere, ya que en esa posición erecta la molécula forma enlaces por los dos extremos mediante los átomos de hidrógeno del grupo NH y los átomos de oxígeno que se encuentran en los anillos de seis miembros de la capa

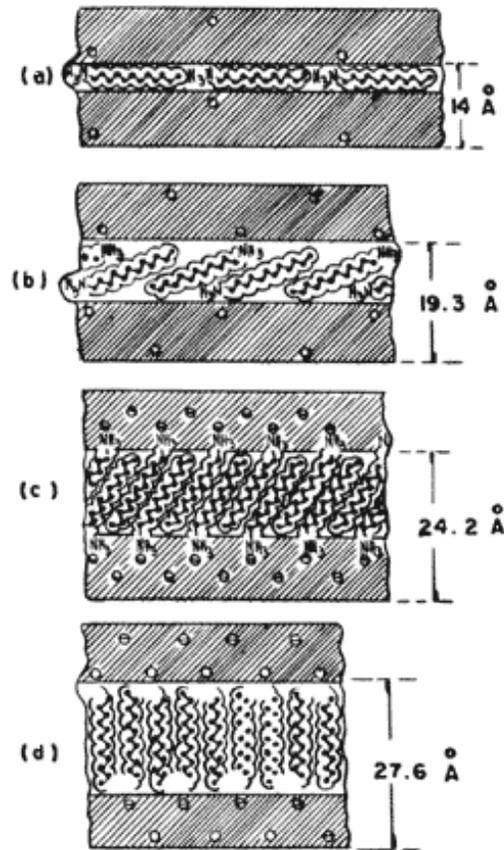


Figura 20. Orientación de las moléculas orgánicas en función de la carga eléctrica creciente.

Luego, estos mecanismos permiten explicar cómo la intercalación de algunas proteínas de gran tamaño induce sólo una pequeña variación de la distancia interlamina, mientras que otras provocan variaciones importantes que no siempre corresponden a su tamaño y configuración. Se ha encontrado que algunos de los complejos orgánicos adquieren gran estabilidad al ser intercalados en el espacio interlamina así, por ejemplo, se tiene que la guanidina, uno de los principales ácidos nucleicos, se mantiene íntegra en la montmorillonita, aun a temperaturas superiores a los 600 grados centígrados.

Otras propiedades de los complejos orgánicos intercalados es su resistencia a la descomposición causada por microbios. Es decir, que las proteínas, enzimas y antibióticos muestran mayor resistencia cuando se encuentran adsorbidos en el espacio interlamina de una arcilla, que cuando se hallan solos. Una de las explicaciones probables de este fenómeno se relaciona con la orientación de las moléculas adsorbidas en la arcilla, ya que en su interior los grupos activos de las moléculas orgánicas son inaccesibles a los agentes externos y, además, al adsorberse sobre las láminas de las arcillas esos mismos grupos se desactivan. Numerosos experimentos han demostrado que los antibióticos adsorbidos pierden su actividad característica al adsorberse en las paredes laminares de las arcillas.

Asimismo, ciertas reacciones químicas que no ocurren en el estado normal de los compuestos orgánicos toman lugar al ponerse en contacto con las arcillas, indicando que estas últimas actúan como catalizadores, tema que será tratado más adelante.

El efecto de las arcillas sobre algunas moléculas orgánicas es claro y evidente en algunos casos. Tomemos por ejemplo las anilinas, las cuales cambian su color al contacto con las arcillas, pasando al color rojo cuando la carga es baja (p. ej. $E = 0.33$ en las montmorillonitas), al azul púrpura cuando la carga es ligeramente mayor ($E = 0.55$ en

las vermiculitas y algunas montmorillonitas) y al negro cuando la carga es alta ($E = 1.0$ o mayor, como en las micas).

EL MISTERIO DE LA PORCELANA CHINA

La porcelana se ha fabricado en China probablemente desde el siglo VI de nuestra era; ya que en el siglo IX se hacían grandes exportaciones a Japón, Corea y los países árabes. El jesuita D'Entrecolles vivió en China de 1711 a 1722, y menciona en sus cartas que en el centro de fabricación de porcelana más importante, unas 180 000 familias trabajaban en la producción, en la que se empleaban 3 000 hornos que trabajaban día y noche. Entre los siglos XVI y XVII la porcelana china se introdujo a Europa creando una verdadera pasión, que asumió proporciones de enfermedad, por la posesión de una de sus piezas tan valiosas. En particular, las porcelanas del periodo Sung (siglos IX al XIII) destacan por su belleza y resistencia, además de su grosor increíble ya que hay piezas de sólo 0.4 mm. de espesor.

El secreto de la fabricación de la porcelana Sung se perdió debido, principalmente, a la invasión mongólica (1286-1386 *d.c.*); los manuscritos originales del periodo Sung se perdieron y aquellos escritos posteriormente mencionan sólo de manera vaga los detalles químicos de la preparación o de la técnica de producción. No obstante, los chinos recuperaron parte de la experiencia previa durante el periodo Ming (siglo XVIII), cuando volvieron a fabricar porcelana de gran delicadeza la cual recibió el nombre de Ling-Lung, es decir, "trabajo del diablo", para indicar que iba más allá de la habilidad humana. Estas porcelanas sólo podían fabricarse por orden directa del emperador, y eran tales sus características de dureza y resistencia que, una vez secadas al horno, se les disminuía el espesor mediante buriles de acero.

Investigaciones realizadas en la época y, más recientemente, en nuestro siglo, mostraron que durante el periodo Ming se empleaba un caolín muy cristalino pero de plasticidad muy pobre y que por sí solo no produce materiales de alta calidad en cerámica, ni ofrece resistencia a la ruptura. Los análisis químicos indican que la porcelana china no se ha modificado en su composición a lo largo de 200 años, por lo tanto se deduce que la calidad del material de base dependía de la sensibilidad del tacto del artesano. Por ello mismo, se deduce nuevamente que el secreto no estaba en los materiales de base, sino que ¡debía ser la técnica! Una de las operaciones esenciales de la fabricación es la molienda del material, que debía hacerse mediante muelas o piedras en la época Sung, a diferencia de los métodos actuales mediante molinos de bolas. Otro aspecto clave del proceso de fabricación era sin duda el añejamiento, ya que los artesanos chinos sometían el material de base a un proceso de añejamiento que consistía en enterrarlo y mojarlo subsecuentemente con orina (sí, leyó bien ¡con orina!) durante periodos que variaban de unos meses a centenares de años. La explicación científica de estos procedimientos, que se aplicaban empíricamente, viene a levantar el velo de misterio que cubría a la porcelana Sung.

Recordemos del capítulo I que la estructura molecular de los caolines consiste en una lámina formada por la unión de una hoja de tetraedros de sílice con otra de octaedros de alúmina y oxhidrilos. Esta estructura es químicamente muy estable y muy resistente al ataque de ácidos o bases. Esto nos conduce a pensar que los procesos de añejamiento mencionados debían tener, principalmente, incidencia sobre la superficie de los cristales, más aún siendo los reactivos una serie de productos derivados de la descomposición de la orina: iones de amonio, urea e iones de **OH**. Ahora bien, puesto que la estructura molecular de los caolines es semejante a una gran molécula bidimensional enlazada por puentes de hidrógeno, por ejemplo **Al-OH—O-Si**, éstos pueden romperse por la acción de ciertos compuestos que tienen la facilidad de penetrar al espacio interlaminar, tal y como ocurre con la urea, la cual penetra en la estructura expandiéndola de 7.2 hasta 10.7 Angstroms; nuestro conocido obús. Otro derivado de la fermentación de la orina es el acetato de amonio, que se forma en cantidades copiosas y, al igual que la urea, tiene gran facilidad para penetrar el espacio interlaminar de las arcillas, expandiendo la estructura laminar de los caolines hasta 14.2 Angstroms. Estos procesos de intercalación no requieren de condiciones especiales sino que se llevan a cabo a temperaturas moderadas, entre 20 y 30 grados centígrados, condiciones que seguramente prevalecen durante el proceso de añejamiento mencionado.

Ahora bien, si ya se ha demostrado que tanto la urea como el acetato de amonio tienen la facilidad de penetrar la estructura de la caolinita y expandirla, ¿qué sucede con las propiedades físicas del material cerámico derivado de esa pasta añejada? La respuesta a esta pregunta es favorable: como lo hemos visto a lo largo de este libro, las propiedades plásticas y la resistencia a la ruptura se incrementan cuanto menos apiladas y más pequeñas sean las hojuelas de la arcilla de base. La intercalación de la urea y los otros compuestos de amonio tiene por efecto cambiar drásticamente la forma de los cristales, sin necesidad de tratamientos mecánicos, ya que las láminas de caolinita se separan unas de otras por efecto de la expansión inducida por la urea, dado que los puentes de hidrógeno son

sustituidos por enlaces con la urea. Los cambios de forma vienen asociados a esta separación, ya que al deslaminarse las hojuelas, las láminas individuales tienden a enrollarse a fin de aliviar la tensión creada por la unión de las hojas tetraédrica y octaédrica, pues éstas tienen distintas dimensiones. El resultado es un material extremadamente plástico, fácil de modelar y con una resistencia mecánica superior. Una vez revelado el secreto de la porcelana china dejo en manos del lector la decisión de iniciar su fabricación.

C) LAS ARCILLAS PILAREADAS

Hasta este momento hemos descubierto las interacciones que tienen lugar entre las arcillas, el agua y las moléculas orgánicas, todas ellas interacciones reversibles. Es decir, que si sometemos al sólido intercalado a un tratamiento térmico o físico-químico, el material recuperará su forma original cuantas veces se repita el ciclo, tal y como ocurre con un acordeón que se expande y se contrae según la fuerza que se aplica sobre sus fuelles. En este aspecto las arcillas son semejantes, precisamente, a ¡un acordeón!

Las arcillas podrían desempeñar un papel importante en múltiples campos a condición de que las dimensiones de su espacio interlaminar fuesen perdurables, es decir, que la separación interlaminar se diera en forma constante, sin importar los tratamientos a que fuese sometido el material. Como veremos enseguida, las arcillas son capaces de actuar como verdaderos catalizadores en un sinnúmero de reacciones de interés industrial, por lo que los científicos idearon la manera de hacerlas estables mediante la fijación de la distancia interlaminar. La estrategia que permitiría realizar este propósito fue fijada en 1974 durante una reunión de especialistas en catálisis. Después de varias discusiones se estableció lo siguiente: para impedir que el edificio laminar de la arcilla recupere su forma inicial es necesario apuntalar el espacio entre los pisos. ¿Cómo?, fue la pregunta colectiva. ¡Mediante pilares!, fue la respuesta lógica, ¡tal y como ocurre con el piso y el techo de un edificio! De esta forma caemos en el mundo de la ingeniería molecular pues utilizando conceptos macroscópicos, como apuntalar el piso y el techo de un edificio, descubrimos la posibilidad de efectuarlos a escala molecular.

Se trata de desarrollar especies químicas de tamaño adecuado para que penetren en el espacio interlaminar de las hojuelas de arcilla, expandan su estructura y, posteriormente, se transformen en otra fase estable que resista convenientemente la desintegración. En forma gráfica este proceso se ilustra en la figura 21.

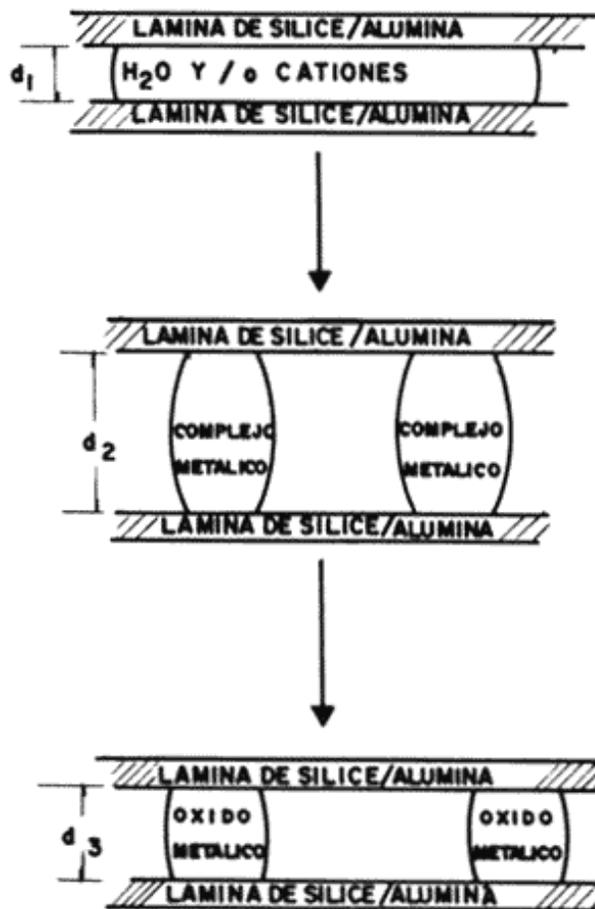


Figura 21. Etapas sucesivas de la intercalación.

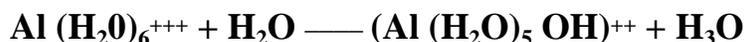
En resumen veamos qué características deben tener las especies químicas a fin de poder ser candidatos al "pilareo" de las arcillas:

- 1) Tener longitudes variables.
- 2) Ser solubles (en agua o en otro solvente de uso común).
- 3) Poseer una carga eléctrica positiva.
- 4) Ser susceptibles de descomponerse en otra especie más estable cuando se les trata térmicamente o mediante otro procedimiento.
- 5) Tener propiedades catalíticas.

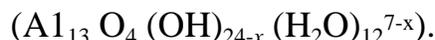
LOS MATERIALES PARA LAS COLUMNAS

Con las premisas anteriores, los investigadores científicos se armaron de "picos y palas" e iniciaron la búsqueda de especies que cumplieran los requerimientos. Los materiales idóneos resultaron ser los inorgánicos, dado que los orgánicos son inestables al efecto de la temperatura. Una de las primeras familias de compuestos inorgánicos fue la de los complejos del aluminio, que se obtienen mediante hidrólisis. En este punto es necesario recordar que cuando el agua se combina con otra sustancia, sin que ninguno de sus enlaces se rompa, se tiene un fenómeno de hidratación. Un ejemplo de este fenómeno es el cloruro de aluminio, el cual se forma con cristalización y que contiene seis moléculas de agua: $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. La tenacidad con la que un ion metálico retiene a las moléculas acuosas varía considerablemente de un elemento químico a otro. Si, por el contrario, el agua reacciona

químicamente con una sal, produciéndose una ruptura de enlaces O-H, entonces se tiene una reacción de hidrólisis, en la cual se producen especies iónicas hidratadas que imparten una cierta acidez. Es común que los hidratos sufran reacciones de hidrólisis las que, en forma simple, podemos representar de la manera siguiente:



No obstante, resulta que cuando una sal de aluminio se hidroliza bajo condiciones controladas se genera una serie de reacciones complejas de hidrólisis y polimerización, las cuales conducen a la formación de especies solubles cuya identidad no está del todo esclarecida. En fin, los científicos buscaron en los catálogos de los productos hidrolizados del aluminio y, para su sorpresa, encontraron que las especies más prometedoras se empleaban con éxito desde hacía muchos años en ¡los desodorantes! Desde el punto de vista fundamental, sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que esas especies tienen como constituyente principal al ion Al_{13} , cuya fórmula química es lo suficientemente compleja como para espantar a un principiante:



La figura 22 (a) ilustra la estructura molecular de este compuesto, el cual está formado por un átomo central de aluminio de valencia 4 (tetraédrico) rodeado por 12 átomos de aluminio de valencia 6 (octaédricos) que forman una cadena, o sea un polímero inorgánico. Este ion tiene asociada una fuerte carga positiva, por lo que es capaz de interactuar con las cargas negativas presentes en las láminas de la arcilla. Es necesario mencionar en este punto que las reacciones de hidrólisis controlada permiten el acoplamiento del Al con otras especies más pequeñas: Al_6 , o bien Al_{13} con Al_{13} para formar Al_{26} , con lo cual la ingeniería molecular adquiere su valor real, al permitir la obtención de especies precursoras de tamaño variable.

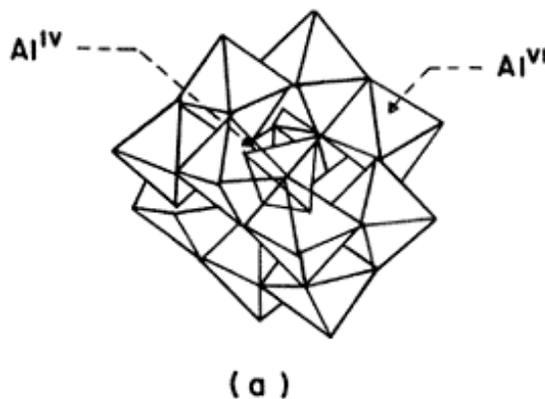


Figura 22 (a). Complejos acuosos de aluminio.

Además del aluminio, también se ha utilizado el circonio, el cual forma iones complejos en solución, por ejemplo el $\text{Zr}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}^{8+}$, que compone unidades tetraméricas del tipo Zr semejantes a las mostradas en la figura 22 (b) con la posibilidad de penetrar el espacio interlamilar y formar especies estables en el interior. Otros complejos menos comunes se pueden obtener a partir de las sales de titanio, cromo, galio, hierro y zinc, principalmente.

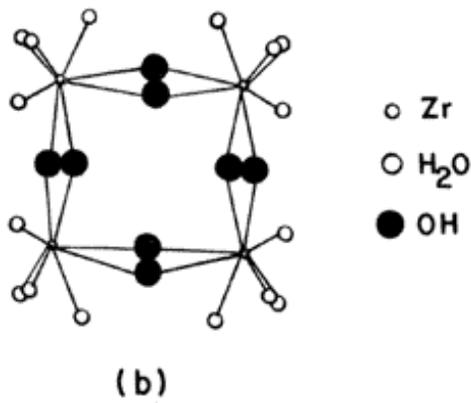


Figura 22 (b). Complejos acuosos de circonio.

Recapitulando, vemos que las especies descritas pueden presentarse en longitudes variables, según la longitud de la cadena polimérica, con lo cual se puede variar el tamaño del pilar formado en el interior del espacio interlamina. También esos complejos son solubles en el agua y portan una carga positiva que, como si fuera un imán, se dirige hacia las zonas de la arcilla con carga negativa, ocupando naturalmente esos espacios mediante un proceso de carácter electrostático. Si hubiera ya otro catión en ese lugar, la especie polimérica tomará su lugar, debido a un proceso de intercambio iónico en el que la fuerte carga positiva de este último determina la posición final.

Finalmente, una vez intercambiados los iones dentro del espacio interlamina de la arcilla, se procede a transformar al precursor del pilar en una especie más estable, lo que abordaremos a continuación.

CONSOLIDANDO EL PILAR

La transformación en un pilar más estable de la especie intercalada se logra mediante un tratamiento térmico, a temperaturas elevadas, que provoca la descomposición del precursor y la transición hacia una nueva fase inorgánica. Esta secuencia, considerando al complejo Al_{13} , se ilustra en la figura 23. Como puede observarse, la expansión de las láminas aumenta por efecto de la intercalación, pasando de 9.4 Angstroms en el estado deshidratado hasta 18.8 Angstroms una vez que el material se ha estabilizado. Un método complementario de expandir la estructura laminar a distancias mayores se logra mediante la intercalación de especies formadas por cationes metálicos distintos, como se indica en la figura 24.

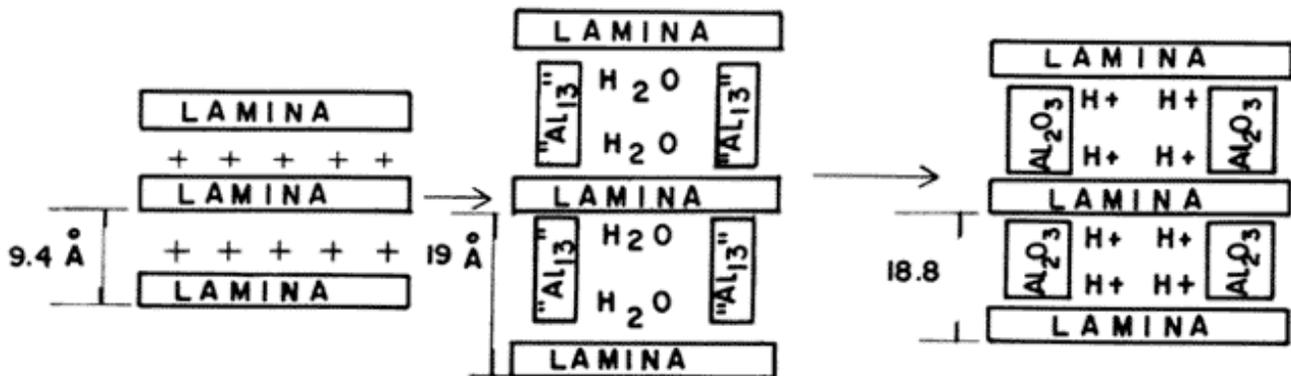


Figura 23. Intercalación y formación de pilares de aluminio en una arcilla.

<i>Complejo metálico</i>	<i>Espacio interlaminar (en Angstroms)</i>
Al	18.8
Zr	22.0
Cr	27.6
Fe	13.9
Ti	29.5

Figura 24. Relación entre el tipo de metal y la expansión alcanzada.

El dominio de la ingeniería molecular no se considera todavía muy completo y aún no estamos en posibilidad de responder todas las preguntas generadas en el proceso de modificación de las estructuras. Por ejemplo, ¿cuál es la naturaleza química del pilar?, o bien ¿qué tipo de anclaje físico se tiene entre la base del pilar y la lámina de arcilla?; ¿cuál es la distribución de los pilares en el espacio interlaminar? Así, aunque todas estas preguntas son de carácter fundamental, tienen interés práctico enorme, cosa que sucede muy a menudo en la investigación científica. Es decir, que las propiedades necesarias para el uso industrial de las arcillas pilareadas están relacionadas con parámetros tales como la estabilidad estructural y el diámetro de los poros, que a su vez dependen de la estabilidad del pilar y de la firmeza de su anclaje a escala microscópica, así como de la distribución de los pilares entre las láminas, siendo todos ellos importantes para llegar al diseño de un tamiz molecular de propiedades adecuadas.

La naturaleza del pilar ha sido estudiada extensivamente en años recientes y, aunque su estructura se asemeja a la de un óxido metálico, lo cierto es que no se cuenta aún con evidencias claras al respecto.

En cuanto a la distribución de los pilares, se presentan dos casos. En el primero se tendría una distribución no uniforme e irregular de los pilares dentro del espacio interlaminar, como se observa en la figura 25 (a), mientras que en el segundo se tendría un arreglo ordenado en donde la distancia entre los pilares es constante (Figura 25 (b)).

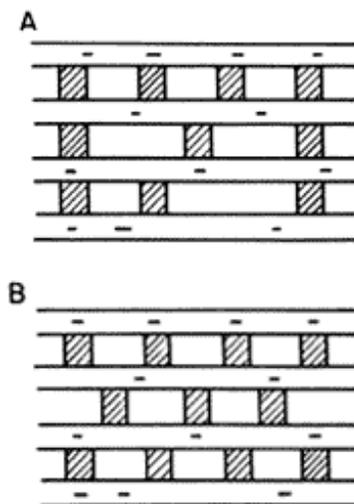


Figura 25. Distribución de pilares en una arcilla A = heterogénea, B = homogénea.

Resulta obvio que esta distancia es de vital importancia si queremos obtener un tamiz molecular que permita la entrada selectiva de moléculas dentro de cierto intervalo de tamaños.

En este punto cabe hacer notar que, a pesar de que las arcillas se utilizan desde hace cientos de años, aún no hemos alcanzado todo el potencial que representan, mediante el diseño inteligente y avanzado de sus propiedades estructurales.

Por último, y a guisa de comparación, fijémonos un momento en la estructura pilareada que se presenta en la figura 26, la cual ha sido estabilizada por muchos siglos más.

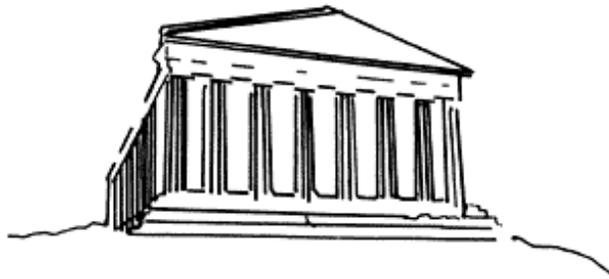


Figura 26. Una estructura pilareada muy conocida.



III. UN REACTOR DE BARRO

EN LAS páginas precedentes hemos descrito numerosos detalles sobre la estructura de las arcillas y los procedimientos que los científicos utilizan para modificarla. Esperamos que el lector se haya convencido de que, desde el punto de vista experimental, no se requiere de técnicas muy complicadas para reorganizar parcialmente la geometría de las arcillas. Cuenta el experimentador con un material de partida que, en su estado natural, presenta ya una estructura muy compleja, la cual ha ido conociendo cada vez con mayor precisión gracias a los avances científicos que poseemos actualmente para caracterizar a los sólidos.



Los químicos, físicos, geólogos y, en general, los estudiosos de lo que hoy en día se conoce como ciencia de los materiales, unen sus conocimientos para convertirse en "maestros de obras". Con picos y palas químicos ensanchan galerías que luego son apuntaladas con nuevas columnas, dando así al entorno una nueva "decoración". Pero los cambios generados son más sutiles y van más allá de la mera expansión del espacio interlaminar, ya que traen consigo modificaciones sustanciales a las propiedades físico-químicas de las arcillas.

Debemos destacar que algunos de estos procesos de modificación se realizan en cierta medida en forma natural y el hombre, desde épocas tan remotas como su propia historia, ha sacado provecho de ellas empleando estos sólidos con diversos propósitos.

Sería presuntuoso de nuestra parte describir todas las aplicaciones potenciales de las arcillas, tanto presentes como futuras. Nuestro enfoque se limitará a describir cómo las propiedades de estos materiales son útiles para promover los procesos de transformación química; es decir su papel como catalizadores.

Hagamos por lo tanto un breve resumen de las propiedades que adquieren las arcillas al introducirse cambios en ellas:

- 1) Pueden alojar en el interior de su estructura cierta cantidad de agua, dependiendo del tipo de elemento químico presente entre las láminas. Se dice en este caso que el material es hidrofílico.
- 2) El carácter hidrofílico del material puede ser suprimido parcial o totalmente intercambiando los elementos químicos iniciales por otros compuestos y convertirlo en organofílico, o sea que la arcilla adsorbe moléculas de tipo orgánico.
- 3) Como consecuencia de las manipulaciones de modificación que se realizan, el mineral acepta o rechaza la

penetración de moléculas en su estructura interna en función del tamaño de las mismas, por lo que se comporta como malla molecular.

4) El "obús químico" utilizado para separar las láminas puede a su vez producir pilares que hacen más rígida la estructura original, impidiendo que se colapse como un castillo de naipes.

5) Por último, estas arcillas son sólidos ácidos, comparables a los inorgánicos como el sulfúrico o clorhídrico.

Si consideramos que cada una de las propiedades anteriores puede tener una gama de valores diferentes, es fácil visualizar el número enorme de estructuras con propiedades específicas que pueden ser diseñadas.

CATÁLISIS Y TRANSFORMACIÓN

Hemos dicho anteriormente que limitaremos la descripción de los usos de las arcillas modificadas al campo de la transformación química, pues pensamos que es allí donde existen perspectivas muy interesantes de empleos útiles para la sociedad, aunque también mostraremos que las arcillas han tenido un muy importante papel protagónico como catalizadores en los procesos biológicos que generaron las primeras moléculas orgánicas en nuestro planeta y, millones de años después, también participaron en la gestación del petróleo.

Desde el punto de vista tecnológico, el empleo de catalizadores en la industria de la transformación ha tenido como propósito fundamental realizar la conversión de los reactivos con un máximo de rendimiento en productos y abatir los costos de producción.

Actualmente se diseñan procesos en los que se trata de invertir la menor cantidad posible de energía y, conocida la problemática que existe alrededor de la degradación ecológica de nuestro planeta, se buscan materiales cada vez más selectivos para orientar la conversión, con mayor precisión, hacia productos más puros, impidiendo las reacciones secundarias indeseables. La madurez e importancia de esta disciplina de la ciencia es tal, que se estima hoy en día que en los países altamente desarrollados el 20% del producto interno bruto se deriva de procesos que dependen de catalizadores. Sin embargo, la tecnología a base de catalizadores tuvo inicios muy peculiares, describiremos algunos que, de paso, nos permitirán subrayar algunas de sus características que los hacen tan importantes en nuestra sociedad.

SALVANDO VIDAS

En 1815, Humphry Davy (1778-1829) descubrió que cuando se introducía un alambre caliente de platino en una mezcla de aire y gas, el metal se volvía incandescente. Davy consideró que se producía oxidación sin que se generara una flama y también notó que, al finalizar la reacción, el metal permanecía aparentemente inalterado. Con esa información, decidió fabricar una lámpara que no reaccionara en forma explosiva al ponerse en contacto con mezclas de gases. El dispositivo en cuestión consistía en una llama protegida por un cilindro que contenía una tela metálica a través de la cual pasaba el oxígeno que la alimentaba. De esta manera el calor era disipado por el metal, y los gases explosivos que pudiera haber fuera de la lámpara no se inflamaban. La lámpara de seguridad de Davy, como se le conoció en su tiempo, se empezó a usar en 1816 en las minas de carbón de Inglaterra, donde se producían numerosas explosiones con las consecuentes pérdidas de vidas, ya que, al aumentar la profundidad de las excavaciones se presentaba el inesperado peligro del gas grisú. Este gas, constituido básicamente de metano (CH_4), al liberarse y entrar en contacto con el aire, forma una mezcla explosiva al contacto con una flama. Se cuenta que al llevar la lámpara al interior de las minas, en enero de 1816, y observar su eficiencia, uno de los directores exclamó complacido: "Por fin hemos sometido al monstruo." A Davy esta aportación le valió un título nobiliario en 1818.

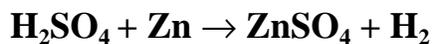
Hoy en día sabemos que el platino preoxida en forma parcial a los gases con lo cual, al combustionarse totalmente, no lo hacen en forma explosiva. La acción del platino fue lo que más tarde Berzelius llamaría catálisis. Sin duda la lámpara de Davy marca un hito en las relaciones entre ciencia y tecnología, como también en el uso de esta última con fines humanitarios, más que económicos.

UN ENCENDEDOR DEL SIGLO XIX

Edmund Davy (1785-1851), primo de Humphry, publicó en 1820 un artículo sobre la preparación de platino finamente dividido que obtenía reduciendo una solución de sulfato de platino por medio del alcohol. El material resultante tenía la propiedad de mostrarse sumamente activo a la temperatura ambiente. Los experimentos de Edmund Davy llamaron la atención de otro químico, esta vez alemán, Johann W. Dobereiner (1780-1849) quien

prosiguió los experimentos de Edmund obteniendo un producto que hoy en día conocemos como *negro de platino*. El material se tornaba incandescente a la temperatura ambiente en presencia de oxígeno, y también lo hacía cuando se le sustituía por hidrógeno. Dobereiner decidió que sus observaciones debían tener una aplicación: inventó un encendedor automático del que se dice se vendieron en su época más de un millón, y que representa una de las primeras aplicaciones de la catálisis en el desarrollo tecnológico.

El aparato consistía en un pequeño compartimiento que, al abrirse una válvula ponía en contacto una solución diluida de ácido sulfúrico con zinc metálico. De esa manera se llevaba a cabo la siguiente reacción:



El chorro de hidrógeno, producto de la reacción, era transportado a otro recipiente que contenía platino finamente dividido, el cual se prendía al momento. El aparato, a pesar de su éxito inicial no se fabricó por mucho tiempo pues el platino era, por una parte muy caro y, además, se desactivaba rápidamente debido a las impurezas que acarrea el hidrógeno generado en el primer compartimiento. La acción catalítica del platino habría de cobrar importancia en la química industrial, pues llevaba a cabo ciertas reacciones rápida y fácilmente con su sola presencia. Algunos años después se descubrió un método mejor para la producción de ácido sulfúrico basado en la catálisis del platino.

LOS SITIOS ACTIVOS

A finales del siglo XIX se había realizado un gran número de reacciones en las que se hacía intervenir al platino y otros metales conocidos para convertir diversas moléculas gaseosas. La oxidación del amoníaco por el platino producía óxido de nitrógeno y agua, ambos precursores del ácido nítrico, con el cual se producen fertilizantes. Se conocía además la conversión catalítica del hidrógeno y el oxígeno para formar agua en presencia del platino y otras reacciones que en algunos casos tuvieron aplicaciones tecnológicas muy importantes y que dieron a la catálisis gran prestigio. Sin embargo, el fenómeno catalítico carecía de una explicación aceptable, a pesar de que se habían avanzado muchas teorías. Por ejemplo, Michael Faraday explicaba que la conversión del hidrógeno y el oxígeno se llevaba a cabo sobre la superficie del metal en el cual se condensaban los dos tipos de moléculas y reaccionaban por su sola proximidad. Hoy en día sabemos que para que la reacción se lleve a cabo, tanto el hidrógeno como el oxígeno deben disociarse; desafortunadamente en 1834, fecha en que Faraday publicó sus observaciones, no se sabía que estas moléculas son diatómicas.

En 1915, Irving Langmuir (1881-1957), un químico estadounidense que trabajaba en la General Electric, propone una teoría sobre la acción catalítica de las superficies metálicas que pone punto final a las especulaciones sobre el fenómeno. El trabajo de Langmuir en sus inicios tenía un propósito más práctico, pues su tarea consistía en tratar de alargar la vida de los filamentos de tungsteno que se empleaban en los focos. Los filamentos se encerraban en una cámara de vacío, pues se suponía que la presencia del aire provocaba la rápida oxidación del metal.

Langmuir demostró que en el vacío, el tungsteno se evapora lentamente, por lo que el hilo se rompe, además de señalar que esta degradación se podía hacer más lenta si se introducía un gas, como el nitrógeno, con el cual el metal no se combinara. Cumplida su misión, Irving decidió estudiar el efecto que producía sobre las superficies metálicas calientes la adición de diversos tipos de gases, llegando a elaborar una teoría que, entre otras cosas, nos dice que la catálisis es un proceso que, en el caso de las moléculas gaseosas que interaccionan con una superficie metálica como condición previa a la reacción, aquellas deben quedar atrapadas en "sitios activos" con los que interaccionan químicamente. La fuerza de dicha interacción es de una magnitud similar a la que hace que los átomos de un sólido mantengan su cohesión. Estas observaciones, entre otras que hizo Langmuir, permitieron a los investigadores interesarse en los estudios sobre las propiedades físicas y químicas de las especies involucradas en el proceso catalítico y tuvieron repercusión profunda en la ciencia de la catálisis, ya que la elucidación del número y naturaleza de los sitios activos en un catalizador, es labor que desde el punto de vista científico y el tecnológico sigue siendo piedra angular para el futuro de esta ciencia. Ya en 1921 Langmuir decía:

La mayoría de los químicos piensan que la naturaleza de la acción catalítica es tan misteriosa hoy en día como lo era en la época de Faraday, sin embargo con los conocimientos que cada día se van generando sobre la estructura de los cuerpos sólidos y los átomos y moléculas que los componen, deberemos gradualmente tener una visión cada día mejor respecto al mecanismo de acción de

dichas superficies.

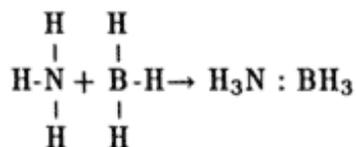
LOS SITIOS ACTIVOS EN LAS ARCILLAS

Se ha mencionado anteriormente que una de las propiedades de las arcillas que las hace materiales útiles en la catálisis es su comportamiento como sólidos ácidos.

En el estudio de la química de las soluciones, el investigador es afortunado ya que trata con moléculas de características bien definidas. La interacción entre un ácido, una base y un solvente puede ser, por lo tanto, calculada empleando principios químicos bien probados. Por el contrario, la comprensión de las interacciones ácido-base en los sólidos es muy difícil, ya que la naturaleza de su superficie no está plenamente definida y muchas veces no se cuenta con datos veraces sobre la composición de los complejos que se forman entre el reactivo y el sólido. A pesar de las diferencias entre la química de las soluciones y la de los sólidos, se usan los mismos tipos de conceptos que pasaremos a revisar en forma breve.

Un ácido, tal y como lo describió J. Bronsted (1879-1947) en 1923, es una sustancia capaz de liberar un ion de hidrógeno. Posteriormente, G. N. Lewis (1875-1946) amplió el concepto de acidez superficial y consideró ácido toda aquella molécula provista de un orbital libre que tiende a unirse a una molécula que posee un par de electrones y que funciona como base.

Un ejemplo clásico es la reacción entre el amoníaco (NH_3), que es una base, y el hidruro de boro (BH_3), que funciona como un ácido:

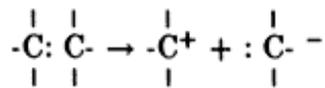


Para Lewis, el ácido más simple es evidentemente el ion de hidrógeno (H^+). La concepción de Lewis se basa por tanto en la regla clásica según la cual el octeto constituye la configuración electrónica más estable (dicha configuración es la de los gases nobles, como el helio o el argón, que no reaccionan con otros elementos). Por otra parte, el carácter ácido de una superficie en el sentido de Bronsted depende de la presencia de grupos funcionales susceptibles de liberar iones de hidrógeno.

LOS SITIOS ÁCIDOS EN LAS ARCILLAS

Trataremos ahora de conciliar los conceptos de acidez en las soluciones con la que se presenta en los sólidos, como es el caso de las arcillas, y responder a la pregunta de por qué es importante conocer la naturaleza y fuerza de estos centros. Para ello es necesario revisar brevemente la importancia que representaban estos estudios dentro del contexto de catálisis.

El primer método que se empleó para obtener gasolina a partir del petróleo fue por calentamiento. Cuando aparecieron en el escenario los primeros catalizadores de inmediato resaltó que la naturaleza y cantidad de productos que se obtenían eran diferentes para cada caso, lo que hizo sospechar que el mecanismo de las reacciones era diferente. A fin de poder identificar con precisión los productos de las reacciones se empezó a trabajar con hidrocarburos aislados, haciéndolos reaccionar con arcillas y otros materiales sintéticos a base de silicoaluminatos. Gran número de hidrocarburos fueron probados y los productos de reacción pacientemente identificados. De este trabajo se llegó a la conclusión de que existía una similitud en el comportamiento de los sólidos catalíticos con el de los ácidos fuertes que intervenían como catalizadores en solución. Esto permitió a los científicos especular que los centros activos que intervenían en las reacciones de desintegración de las moléculas del petróleo eran sitios ácidos. Ya en 1947 el mecanismo de las reacciones se había esclarecido lo suficiente como para proponer que se llevaban a cabo por medio de intermediarios iónicos. Se sabe hoy en día que el primer paso en estas reacciones es la formación de un ion carbonio, el cual podemos visualizar como un catión orgánico con una carga asociada al átomo de carbono. Una de las maneras como se forman los iones carbonio es por la fisión de una molécula estable en la cual uno de los fragmentos toma dos electrones y las especies resultantes forman un par iónico:



Debemos anotar que la presencia de iones carbonio había sido reportada por los químicos orgánicos en el año de 1900. Cuando se aplicó este concepto a las observaciones que se habían hecho sobre la reactividad de los hidrocarburos, así como a los productos generados, se pudo comprobar que el mecanismo concordaba perfectamente, emergiendo de ello toda una teoría, llamada del ion carbonio, con la cual es posible predecir cuantitativamente su formación y reacción, empleando las herramientas usadas en la química teórica.

Las arcillas presentan sitios ácidos de fuerza variable, tanto de tipo Bronsted como Lewis. Es obvio que la manera de identificarlos y contarlos será haciéndolos reaccionar con bases. Si conocemos la estructura de la base empleada y su fuerza relativa, entonces podemos, con la ayuda de diversas bases, hacer una especie de mapa sobre la distribución y tipo de sitios ácidos presentes. Por otra parte se sabe actualmente que las diversas reacciones catalizadas por sólidos ácidos tienen en muchos casos requerimientos específicos sobre la naturaleza y fuerza del ácido para llevarse a cabo. Por lo tanto, dependiendo de la forma de preparar el sólido catalítico y de activarlo es posible hacer concordar los requerimientos de acidez con los de reactividad.

LAS ARCILLAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA

La búsqueda de una explicación precisa de cuáles fueron los constituyentes de partida que dieron origen a los seres vivos, es decir, aquellos sistemas capaces de reproducirse a expensas de su energía interna, ha constituido un enigma que preocupó ya a los primeros filósofos. Los hombres sabios de la antigua India, de Babilonia y de Egipto elaboraron varias cosmogonías para tratar de explicarlo. Entre las primeras destaca la que consideraba que la vida se había creado por generación espontánea, como resultado de la voluntad de fuerzas sobrenaturales. Los griegos hicieron progresos tratando el problema por métodos "científicos", aunque persistieron en creer en la autogénesis. Esta idea persistió en la Edad Media y parte de los tiempos modernos hasta que Louis Pasteur derrumbó el mito de la generación espontánea. Sin embargo, la pregunta original sigue vigente: si un organismo sólo puede ser creado por otro, ¿cómo se inició la vida?

La respuesta lógica es que la evolución química debió haber precedido a la biológica y lo demás que se añada es mera especulación. Esto ya había sido reconocido por Darwin, quien afirmaba que si en su tiempo se hubiera creado una sustancia proteica capaz de seguir experimentando transformaciones complejas, seguramente sería incapaz de hacerlo, ya que las condiciones óptimas para su evolución sólo existieron en la época en la cual no había vida. Experimentalmente es por tanto imposible reproducir las condiciones que existían en la época prebiótica y los resultados que obtengamos de dichas observaciones mostrarán únicamente probabilidades de que la vida se haya iniciado de tal o cual manera. Lo que pueden hacer los físicos y químicos es construir modelos y probar en qué grado éstos son consistentes con los hallazgos de los biólogos, geólogos, antropólogos, etc. Lo que sabemos del periodo que precedió a la vida, de acuerdo con las investigaciones geoquímicas, es que se inició de mil a dos mil millones de años atrás. La composición de la atmósfera original ha sido motivo de considerable discusión, aunque es generalmente aceptado que la mezcla actual, a base de nitrógeno y oxígeno, no pudo haber sido la original. Es muy difícil obtener evidencias, aun aproximadas, de cuáles fueron los componentes de partida pero se acepta que su naturaleza debió ser semejante a la de la nebulosa que formó nuestro sistema planetario. Un hecho parece claro: hace dos mil millones de años la atmósfera no contenía oxígeno, pero mil millones después era rica en ese elemento. En el intervalo de tiempo transcurrido entre ambos eventos emergió la vida. Muchos experimentos de laboratorio se han realizado con el fin de demostrar cómo es posible generar sustancias orgánicas a partir de compuestos inorgánicos, aun en ausencia de oxígeno. Tal vez uno de los más importantes fue el realizado por Stanley Miller en 1953. Estudiante recién graduado, Miller trató de recrear las condiciones prebióticas en un aparato de vidrio: puso unos litros de metano, amoníaco e hidrógeno para simular la atmósfera; añadió un poco de agua ("el océano") y adaptó un dispositivo capaz de generar descargas eléctricas. Después de calentar la mezcla durante algunos días analizó su contenido, encontrando varios compuestos orgánicos, notablemente aminoácidos. Después de Miller muchos investigadores han realizado trabajos similares, empleando otras sustancias de partida, demostrándose así la posibilidad de sintetizar moléculas orgánicas más o menos complejas. Baste decir que, sin importar el cómo se generaron estas primeras especies, demos por hecho de que aparecieron y que estructuralmente tenían la capacidad de seguir evolucionando por reacciones entre sí. A. Oparin, científico ruso, opina en su libro sobre el origen de la vida que las moléculas orgánicas prosiguieron su evolución hasta que, al alcanzar cierto

tamaño, se separaron del medio acuoso asíándose por medio de una especie de membrana impermeable al agua. Muchos autores no aceptan este esquema de Oparin pues consideran difícil visualizar un sistema cerrado en el cual se lleva a cabo una química diferente a la del medio que la rodea sin que dicho sistema llegue a un estado de equilibrio, hecho que desde el punto de vista termodinámico implica que ya no hay variación en la energía libre y por ende, en el caso de una célula, ésta se hallaría muerta. Adicionalmente, el mecanismo no es aceptado por la dificultad de visualizar cómo unas moléculas orgánicas, flotando en un inmenso océano, hayan tenido oportunidad de encontrarse y reaccionar.

LA TESIS DE BERNAL

J. Bernal en su libro sobre los orígenes de la vida, publicado en 1967, opina que, dada la extrema dilución de las sustancias orgánicas, las reacciones químicas serían extremadamente lentas por lo que propone que inicialmente se llevó a cabo una concentración de las moléculas, seguida de reacciones de polimerización, es decir crecimiento de cadenas de sustancias orgánicas, todo esto llevado a cabo en las arcillas depositadas en la orilla de los océanos y lagos.

Las razones que se argumentan para esta hipótesis son las siguientes:

1) Las arcillas, por su capacidad de expandirse, pueden alojar en su interior moléculas orgánicas de gran talla.

2) El crecimiento de la estructura de las moléculas se lleva a cabo inicialmente por reacciones de polimerización, las cuales son catalizadas por centros ácidos como los presentes en las arcillas. Un punto adicional es que, en dichas reacciones de polimerización, uno de los productos de la reacción es el agua, la cual debe ser eliminada del medio para favorecer el curso de formación de los materiales orgánicos. Lo anterior es factible de realizarse en las arcillas, dada su capacidad de convertirse en materiales organofílicos.

Veamos algunos resultados de laboratorio que apoyan las tesis de Bernal y que fueron realizados con montmorillonita a la cual se le sustituyó parcialmente el aluminio original de la estructura, que es trivalente, por iones magnesio, divalentes, con lo cual se crean centros fuertemente negativos, los cuales son capaces de realizar su adsorción y reacción posterior de los materiales orgánicos. Los investigadores del Instituto Weizmann de Israel pusieron en contacto la arcilla con un aminoácido adenílico, que es el material de partida para la formación de proteínas en las células y cuya fórmula mostramos en la figura 27.

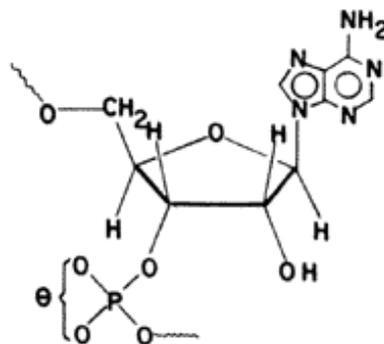


Figura 27. Estructura del aminoácido adenílico, precursor de las proteínas.

Los científicos observaron que al poner en contacto la montmorillonita con la molécula orgánica en una solución acuosa, a la temperatura ambiente, se produce primero una adsorción del material biológico y luego éste se polimeriza dando origen a cadenas polipeptídicas de diferentes pesos moleculares. Como sabemos, las cadenas polipeptídicas son las que forman las proteínas dentro de las células.

En el caso de la estructura mostrada en la figura, la reacción de polimerización se llevaría a cabo empleando la adenina, que corresponde a la molécula que contiene N (nitrógeno) en la parte superior derecha de la estructura. Esta molécula de adenina se polimeriza produciendo (adenina)_n, que es el polipéptido que hemos mencionado, dando como resultado productos con valores de "n" variables. La observación interesante que hicieron los autores de este trabajo está relacionada justamente con los valores de "n". Cuando la reacción se realiza en ausencia de arcilla empleando un ácido inorgánico, se observa que los polipéptidos formados son de tamaño pequeño y su distribución muy homogénea. Por el contrario, la distribución de pesos moleculares en los productos analizados de la reacción con la arcilla muestra que la distribución es heterogénea, es decir, hay ciertos valores de "n" que no aparecen en los polipéptidos así formados. Curiosamente otros autores que han trabajado sobre el mismo tema han hecho hincapié en que los procesos vivientes se caracterizan por tener la capacidad de seleccionar cadenas de ciertos pesos moleculares específicos a pesar de que no existe impedimento para que dicha distribución sea homogénea.

De lo que hemos aprendido sobre el comportamiento de las arcillas sabemos que el elemento inicialmente presente puede ser intercambiado por otros y así se modifican no sólo las propiedades de adsorción sino también las catalíticas, al variar la distribución de los centros ácidos. Esto sugeriría que la arcilla actúa como una especie de molde prebiótico que va a determinar un código inicial el cual, por evolución posterior, producirá selectivamente ciertos tipos de secuencias de moléculas complejas que, ulteriormente, se convertirán en sistemas vivientes. El apreciado lector tiene la palabra para opinar si esto pudo haber sido o no, tomando en cuenta la forma característica de la molécula de la vida: el ADN: una doble hélice limitada en la anchura pero ilimitada en su longitud.

EL ORIGEN DEL PETRÓLEO

En el curso de los últimos cien años el origen del petróleo ha intrigado a geólogos, químicos, físicos y microbiólogos, sin que hoy en día exista una teoría por todos aceptada sobre su génesis. Lo anterior estriba en buena parte en que el petróleo presenta una composición química muy compleja, aunado al hecho de que en su gestación interviene un gran número de variables físicas y químicas que, dada su formación millones de años atrás, no podemos conocer con precisión. Para colmo de males el petróleo es un fluido que se origina en un lugar pero migra a otros sitios, por lo que nunca se puede afirmar categóricamente: "aquí se formó el petróleo."

La falta de "cooperación" del material en revelar todos sus secretos a los científicos no ha impedido que cada grupo que lo estudia haga especulaciones sobre su formación y, por lo tanto, existen tantas teorías como artículos hay escritos sobre el tema. Se ha sugerido que se formó por la polimerización de los gases atrapados en las rocas basálticas, reacción por cierto catalizada por los ácidos; otros afirman que la materia que le dio origen no es otra que el carbón vegetal y hasta se han avanzado teorías sobre su origen cósmico.

Una aproximación que a muchos les ha parecido útil es investigar su origen a partir de los datos que existen sobre su composición actual. Esta tarea no es nada fácil y, para ejemplificarlo, diremos que en 1927 el Instituto Norteamericano del Petróleo puso las bases de un proyecto cuyo propósito era identificar todos los componentes del petróleo, empleando los métodos analíticos disponibles. La tarea era monumental, baste decir que, 27 años después, se informaba que 141 componentes se habían aislado y purificado. Se trataba únicamente de hidrocarburos que contenían átomos de carbono e hidrógeno que iban desde uno a veinte carbonos; sin embargo esta cantidad sólo representa el 44% del total de los componentes, ya que más adelante se identificaron hidrocarburos de hasta 30 átomos de carbono y combinaciones más complejas de moléculas que, además de carbono e hidrógeno, contienen nitrógeno y azufre, así como sustancias cuya estructura presenta metales como níquel o vanadio.

Gran parte de los yacimientos petrolíferos se encuentra asociada a sedimentos marinos, en los que se nota la presencia de rocas de todas las edades, de la era Cambriana hasta el Plioceno, aunque se considera que el rango de tiempo que tomó la formación del petróleo abarca unos 500 millones de años. Hoy en día existe un consenso casi general de que su origen es orgánico, derivado de materiales que fueron sintetizados por vegetales superiores en los continentes o por algas y otros organismos planctónicos en mares y océanos. Lo anterior es evidente si vemos la similitud estructural entre la molécula aislada de un vegetal y la obtenida de un crudo de petróleo tal y como se muestra en la figura 28.

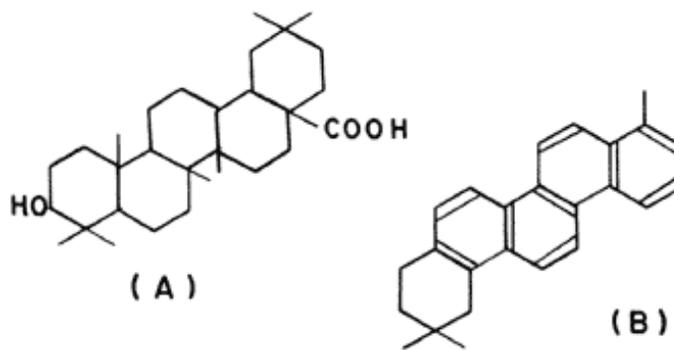


Figura 28. Estructura de una molécula aislada de un vegetal y otra de petróleo.

Si la materia orgánica que dio origen al petróleo estaba constituida por componentes provenientes de vegetales y animales, ¿cómo se transformó esa masa en una mezcla fluida con la composición que conocemos actualmente? Se cree que la materia orgánica se acumuló en vasos lacustres o marinos formando el querógeno, término que describe a una compleja molécula heterogénea, fuente del petróleo. Contrario a lo que pudiera pensarse, la transformación no se llevó a cabo a temperaturas muy elevadas. Inicialmente hubo una degradación, llevada a cabo por microorganismos, y luego la masa parcialmente degradada fue, con el curso de los años, hundiéndose en la corteza terrestre para ahí continuar su evolución a temperaturas entre 200 y 250 grados centígrados, puesto que en el análisis de crudos se ha encontrado sustancias que se descomponen a temperaturas superiores a las marcadas.

Si la masa no penetró muy profundamente en la corteza, entonces se formaron los llamados esquistos bituminosos, constituidos por rocas que contenían materia orgánica que no evolucionó, esquistos que se convirtieron en los hidrocarburos típicos del petróleo. Esto se debió a que la temperatura no fue muy elevada (se calcula que la temperatura aumenta a razón de 1°C por cada 42 metros de profundidad) y sólo hubo degradación microbiana. Cuando la masa alcanzó los 200°C ya no pudo ser degradada por seres vivos, por lo que la conversión debió proseguir a través de reacciones químicas. Paralelamente se generaron otros procesos que dieron origen a los llamados aceites pesados y arenas asfálticas; materiales geológicamente más viejos que el petróleo ya que se trata de yacimientos que se depositaron en lugares donde existían rocas porosas y que sufrieron degradación química y bioquímica adicional por la invasión de agua, proveniente de la superficie, rica en oxígeno disuelto, lo que permitió a las bacterias aeróbicas degradar selectivamente los hidrocarburos ya formados.

LAS ARCILLAS Y LA GASOLINA

Terminado este esbozo de la génesis del petróleo, pasemos también a la especulación. Una pregunta que muchos investigadores se han hecho es cómo se formó la gasolina presente en el petróleo, o en forma más general, cómo se formaron los alcanos lineales. Entre paréntesis, debemos decir que la gasolina está compuesta, en parte, por alcanos, moléculas formadas por carbono e hidrógeno cuya fórmula general es $C_n H_{2n+2}$ en donde n vale de uno a treinta o más. De estos hidrocarburos existen muchas variedades, los hay formando cadenas lineales o ramificadas, anillos, etcétera.

En la figura 29 se muestran algunos ejemplos de los principales tipos de hidrocarburos aislados del petróleo y se indica el porcentaje relativo de cada variedad; la letra R de las fórmulas representa grupos $(C-H)_n$.

HIDROCARBURO	FORMULA	%
ALCANOS		14
		18
CICLOALCANOS		10
		11
AROMATICOS		26
		21

Figura 29. Algunos tipos de hidrocarburos presentes en el petróleo y su porcentaje de abundancia.

Hemos dicho con anterioridad que del estudio de los componentes del petróleo se puede obtener pistas de su origen: pues bien, estudiando la composición de los yacimientos "jóvenes" y los geológicamente más viejos y comparando los resultados con los de los crudos que se extraen actualmente, los geoquímicos orgánicos han llegado a la conclusión de que los precursores de los alcanos fueron los ácidos grasos. Se piensa además que esa transformación se llevó a cabo en presencia de arcillas.

En primer lugar, revisemos en la figura 30 las fórmulas de algunos ácidos grasos que se han aislado en el petróleo. Recuérdese que si el último H de la fórmula química de los ácidos grasos es sustituido por un ion sodio, lo que se obtiene es el conocido jabón de tocador.

<i>Nombre</i>	<i>Fórmula</i>
<i>n</i> -heptoico	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_5 \text{COOH}$
2-metilcaproico	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_3 \text{CHCOOH}$
	CH_3
3-metilcaproico	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_2 \text{CHCH}_2 \text{COOH}$

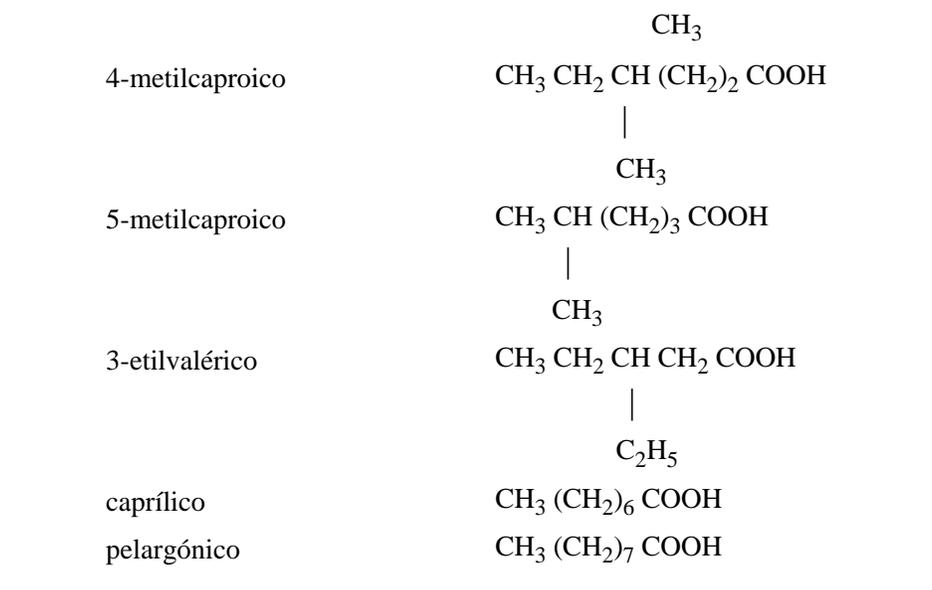


Figura 30. Variedades de ácidos grasos aislados del petróleo.

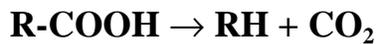
Cuando se realiza un análisis más detallado de los ácidos grasos y los alcanos presentes en los yacimientos "jóvenes" o "viejos", se obtienen los datos que mostramos en la figura 31. Marcamos en ella con (+) un valor numérico pequeño y con (+++) un valor grande.

Parámetro	Yacimiento	
	joven	viejo
Abundancia ac. graso	+++	+
Ac. graso $\frac{\text{par}}{\text{impar}}$	+++	+
Abundancia alcanos	+	+++
Alcano $\frac{\text{impar}}{\text{par}}$	+++	+
Tamaño de cadena de alcanos	grande	pequeña

Figura 31. Abundancia de ácidos grasos y alcanos en yacimientos: (+) poca, (++) mucha.

Los resultados nos enseñan que hay una tendencia, que no parece casual, en la desaparición de los alcanos lineales impares y la de los ácidos grasos pares; esto a medida que el tiempo transcurre y aumenta la profundidad a la que se encuentra el yacimiento. Es de hacerse notar que en el petróleo crudo que se extrae los alcanos y los ácidos grasos presentan distribución homogénea en pares e impares.

La explicación, según varios investigadores, consiste en pensar que el ácido graso inicialmente presente en la materia orgánica (predominantemente pares en el número de átomos de carbono) sufre una descarboxilación, es decir la pérdida del grupo **-COOH**, lo que da origen a un alcano:



R representa una larga cadena de grupos CH_3 .

El alcano formado se fragmenta a su vez (reacción de desintegración) en alcanos más pequeños



UN MODELO DE FORMACIÓN

Se piensa que, en primer término, las arcillas de tipo montmorillonita concentraron en su interior los ácidos grasos por un fenómeno de adsorción, expulsando el agua estructural (es decir que se volvieron parcialmente organofílicas) y con esto se generaron centros ácidos activos que catalizaron las reacciones de descarboxilación y desintegración.

El modelo que hemos presentado se ha simulado en el laboratorio. En 1971 se publicó un informe sobre la reacción de descarboxilación del ácido graso de cadena lineal que contiene 22 átomos de carbono. Se escogió este ácido porque es típico de los yacimientos "jóvenes". El material se puso en contacto con una montmorillonita parcialmente hidratada, que contenía calcio en su estructura. Los resultados de la reacción mostraron que se producían predominantemente alcanos y, en particular, el que tenía un átomo de carbono menos que el ácido graso original.

El modelo geoquímico para el proceso que hemos descrito se puede observar en la figura 32, donde se grafica la profundidad de la corteza terrestre y la temperatura correspondiente en función de los dos tipos de reacciones que se llevan a cabo. Se postula que, al aumentar la temperatura, la arcilla genera centros ácidos del tipo Lewis, donadores de iones hidrógeno, que catalizarían dichas reacciones.

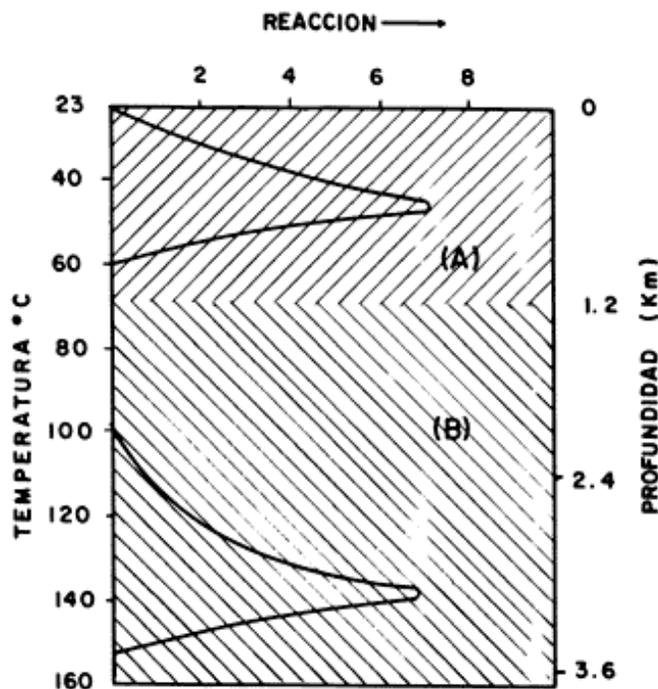


Figura 32. Modelo geoquímico para la formación de alcanos: en una descarboxilación y en una desintegración.

LAS ARCILLAS Y EL FUTURO ENERGÉTICO

En los últimos cien años la humanidad ha consumido, básicamente para proveerse de energía, unos 900 000 millones de barriles de petróleo, cantidad que equivale a quemar madera y aceites animales durante 1 300 años. Muchos esfuerzos se han realizado últimamente para racionalizar el uso del petróleo como energético, buscando por ejemplo fuentes alternas al mismo. La realidad es que para el año 2000 el 55% de toda la demanda mundial de energía será aportada aún por el petróleo. ¿Cuánto petróleo existe y para cuántos años más alcanza?, es una pregunta formulada de manera continua. Los estrategas de la planeación económica de todo el mundo hacen sus predicciones en función de las reservas de petróleo, clasificadas en dos tipos: las probadas y las potenciales.

Las reservas probadas hoy en día se estima que equivalen a 900 000 millones de barriles de petróleo y una cantidad equivalente de gas. Se trata aquí del petróleo depositado en yacimientos marinos y terrestres, explotable con las tecnologías disponibles hoy en día. Las reservas potenciales incluyen aquellas que se presume deberán descubrirse y cuya estimación es muy variable. Si se considera que el ritmo de consumo anual sea en el futuro el mismo que hoy en día, con las reservas probadas tendremos petróleo para los próximos 45 años; si sumamos las potenciales, el número de años se extiende a 170. Los economistas quedan satisfechos con sus cálculos, pero quien trabaja en la industria petrolera es más pesimista, ya que se enfrenta a futuro con dificultades técnicas para satisfacer la demanda. ¿Por qué? La respuesta la daremos con algunos datos adicionales en los que mostramos, de acuerdo con los especialistas, el tipo y porcentaje de los petróleos que se utilizan en las referidas predicciones, véase la figura 33.

<i>Fuente</i>	<i>Reservas (%)</i>	
	<i>probadas</i>	<i>potenciales</i>
Petróleo convencional	53.1	25.8
Petróleo pesado y arenas asfálticas	31.3	27.8
Esquisitos bituminosos	15.6	46.4

Figura 33. Origen de las reservas mundiales de hidrocarburos.

Se llama petróleo convencional al que es fácilmente transformado en productos refinados de alto rendimiento mediante los procesos y catalizadores actuales. Desafortunadamente, este tipo de petróleo ha disminuido en forma constante desde hace mucho tiempo, por lo que hay que refinar crudos más "pesados" (el crudo Maya es un ejemplo), o sea un material que, con la tecnología actual, produce mucho menos rendimiento en refinados debido a su composición, ya que posee moléculas de alto peso molecular, además de que contiene un porcentaje de azufre, níquel y vanadio superior a los crudos ligeros.

El procedimiento más empleado por la industria de la refinación para aumentar la producción de hidrocarburos gaseosos, útiles en los procesos petroquímicos de las gasolinas, diesel y lubricantes a partir de ciertas fracciones del petróleo, es sin duda el proceso de desintegración catalítica. La fracción se pone en contacto con un catalizador ácido a temperatura elevada y éste promueve la fragmentación de las moléculas, reduciéndolas a tamaños menores. Las arcillas naturales fueron usadas intensamente como catalizadores con este propósito hace unos 45 años. Básicamente se emplearon montmorillonitas tratadas con ácidos (proceso Houdry).

Si se controlaba con cuidado la intensidad del tratamiento, se obtenía un producto con buena actividad catalítica; un exceso hacía que se perdiera totalmente su función. En el tratamiento, se eliminaban principalmente iones aluminio de las posiciones octaédricas de la montmorillonita, provocando en la estructura una carga negativa que era neutralizada por el ion hidrógeno. Este hidrógeno, se cree, era la fuente de la actividad desintegradora del

catalizador. Una desventaja tenían las arcillas y era la presencia en su estructura del ion hierro, el cual provocaba una excesiva cantidad de carbón proveniente de la degradación total de los hidrocarburos; además, las arcillas no eran térmicamente muy estables cuando se hacía necesario elevar la temperatura para restituir la actividad catalítica.

Las arcillas fueron paulatinamente desplazadas por otros materiales. En particular, en los años sesenta hicieron su aparición las zeolitas, que ofrecían mayor conversión, altos rendimientos en gasolina y elevada estabilidad frente a la temperatura. La estructura zeolítica, formada por bloques de SiO_4 y AlO_4 se une entre sí mediante puentes de oxígeno, formando estructuras que tienen poros con dimensiones moleculares y que, dependiendo del tipo de zeolita en cuestión, poseen aberturas de poros que van desde los 2 Å hasta los 8 Å. De esta manera la zeolita tiene la capacidad de permitir o no la entrada de reactivos en el interior de su estructura y llevar a cabo las reacciones ácidas con suma eficiencia.

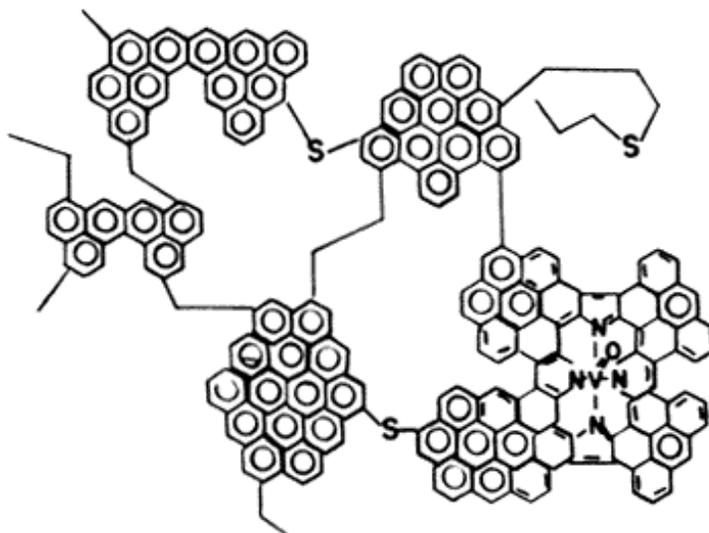


Figura 34. Estructura de una molécula aislada del petróleo pesado, que contiene vanadio.

La necesidad de refinar crudos pesados trae consigo la dificultad de hacerlo con los materiales zeolíticos de que disponemos hoy en día: la abertura de los poros en las zeolitas es mucho menor que el tamaño de muchas de las moléculas presentes en los crudos pesados. Además, las altas concentraciones de metales como el níquel y el vanadio las inactivan o, peor aún, las destruyen. En la figura 34 mostramos una versión simplificada de la estructura de una de las moléculas que contienen vanadio y que se hallan en los crudos pesados, a la que se determinó mediante estudios de rayos X. Para resolver el problema de la refinación de los crudos actuales, se han mencionado varios tipos de estrategias, las más importantes son las siguientes:

1) Emplear zeolitas con abertura de poro mayor a las que hoy empleamos. A nivel mundial se intenta sintetizar afanosamente nuevas estructuras que posean esta característica sin que pierda la actividad catalítica.

2) Fragmentar el crudo con otro tipo de catalizadores que produzca moléculas capaces de penetrar las cavidades zeolíticas.

3) Buscar otro tipo de materiales porosos con alta actividad y selectividad apropiada. En este caso, las arcillas expandidas resultan ser los candidatos idóneos como también lo son para la estrategia precedente.

Veamos qué sucede cuando una fracción de crudo pesado se hace pasar por un reactor donde hay un catalizador, a la temperatura de 560° C. En el experimento se utilizarán dos tipos de sólidos: el primero estará constituido por un

catalizador de desintegración a base de zeolita, al que llamaremos "CZ". En el segundo experimento emplearemos un catalizador mixto, compuesto de 20% de zeolita y 80% de arcilla del tipo montmorillonita expandida con un oligómero de aluminio, y que llamaremos "CAZ". La corriente que emerge del reactor es analizada en sus componentes, con lo cual se puede determinar qué porcentaje de la carga se convierte en productos (% Conv.) y de lo convertido, cuánto es gasolina y aceite ligero, lo que denominamos selectividad, S_{gasolina} y $S_{\text{aceite ligero}}$ respectivamente.

Observemos los resultados de las dos experiencias en la figura 35.

Parámetro	Catalizador	
	CZ	CAZ
Conversión del crudo	57.2	72.1
Selectividad gasolina (%)	27.6	30.4
Selectividad aceite ligero (%)	15.1	12.7

Figura 35. Conversión catalítica de un crudo mediante catalizadores a base de zeolitas (CZ) y de zeolita + arcilla (CAZ).

Como se puede apreciar, la estrategia parece dar resultado ya que la adición de la arcilla al catalizador de zeolita hace que aumente la conversión del reactivo así como la cantidad de gasolina producida, por lo que se concluye que las grandes moléculas son fragmentadas en la arcilla y luego pasan a la zeolita en donde se continúan las reacciones de desintegración.

Hemos mencionado antes que muchos crudos pesados contienen cantidades importantes de compuestos orgánicos de níquel y vanadio. Las arcillas expandidas ofrecen la posibilidad de atrapar estas moléculas por medios catalíticos, impidiendo así que dañen los catalizadores de zeolita. Para eliminarlos se requiere que el sólido contenga dos funciones: una ácida, que provoque la ruptura de los enlaces, y otra capaz de introducir hidrógeno en los fragmentos resultantes, ya que si no se hidrogenan totalmente tienden a formar residuos carbonosos que inhabilitan la actividad catalítica. La función hidrogenante en el catalizador la aporta un metal depositado *ex profeso*.

En una serie de experimentos se expandió una arcilla de tipo montmorillonita con un oligómero orgánico a base de hierro y una muestra adicional con uno de aluminio. Los materiales fueron evaluados por separado, haciéndolos pasar en un reactor, durante 72 horas, una carga consistente en un crudo con cantidades conocidas de níquel y vanadio. Los resultados mostraron que la arcilla expandida con aluminio tuvo muy poca capacidad de eliminación, como era de esperarse, por no tener la función hidrogenante. En la figura 36 se resumen los resultados obtenidos con la arcilla que contiene hierro, en la que se grafica el porcentaje de metal eliminado de la carga en función de la temperatura de reacción.

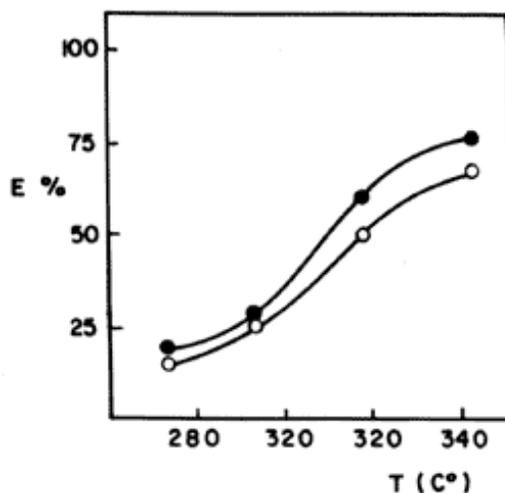


Figura 36. Eliminación porcentual de vanadio (●) y níquel (○) mediante un tamiz de arcilla en función de la temperatura de reacción.

Cuando estos datos se confrontan con los que se obtienen con los catalizadores actualmente empleados en las refinerías, que son de naturaleza química diferente, se comprueba que si bien el porcentaje de eliminación es semejante, la arcilla realiza la tarea a temperatura inferior, lo que representa un ahorro en energía.

LAS ARCILLAS EN ACCIÓN

Hemos resaltado a lo largo de este capítulo que una de las ventajas destacables de las arcillas modificadas frente a otros sólidos porosos la constituye su capacidad de adsorber y hacer reaccionar en el interior de su estructura moléculas de gran tamaño.

Como último ejemplo del potencial que ofrecen estos nuevos materiales, presentaremos algunos resultados obtenidos por J. Shabtai y sus colaboradores que fueron tratados en el 7° Congreso Internacional de Catálisis efectuado en Japón. Los autores del trabajo hicieron un estudio comparativo de la reactividad de tres diferentes moléculas orgánicas frente a una zeolita Y, la que se emplea en los catalizadores en la desintegración de los gasóleos y una montmorillonita expandida. Se sabe que la abertura máxima de los poros zeolíticos tiene un diámetro aproximado de 8 Å y las tres moléculas escogidas diámetros de 6.2, 7.5 y 9 Å. Estos diámetros de las moléculas, hemos de aclarar, que son valores absolutos y se calculan a partir de estimaciones teóricas. Sin embargo tal es quizá el método más práctico que se tiene para medir la abertura de los poros. El experimento consistió en evaluar la velocidad de transformación por minuto del reactivo, referida a una masa idéntica de sólido en cada caso. La reacción en que se emplearon las moléculas sonda fue realizada a 350° C y con el fin de exponer los resultados no es necesario dar los valores absolutos de tales velocidades, así, en el caso de la zeolita le daremos el valor relativo de 1 (V_r); en el de la arcilla, el número de veces que la velocidad de transformación fue más rápida que 1.

En la figura 37 se representan los resultados. Se dibujó la estructura de las moléculas-reactivo empleadas y, entre paréntesis, va anotado el diámetro que se les calculó en Angstroms.

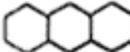
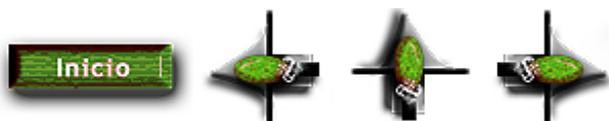
REACTIVO			
CATALIZADOR	$\text{CH}_3\text{-CH-CH}_3$  (6.2 Å)	 (7.5 Å)	 (9 Å)
(V _R) EN ZEOLITA	1	1	1
(V _R) en ARCILLA	1.05	1.43	4.02

Figura 37. Comparación entre las velocidades de reacción (V) en la conversión de tres reactivos con distinto diámetro cinético.

Es evidente que, al aumentar el tamaño de la molécula, la zeolita tiene más dificultad para convertirla por lo que la velocidad de reacción de la arcilla es cada vez mayor ya que en ella no existe el problema de que el reactivo no penetre al interior de la estructura.

Debemos mencionar que el trabajo fue presentado en 1980 y que, en la sección de comentarios del Congreso, el representante de una industria petrolera dijo: "Quiero felicitarlos por este trabajo tan innovador, realizado con tanta imaginación. Tengo la impresión de que esto representa el punto de arranque de nuevos desarrollos que se iniciaron hace años con los catalizadores zeolíticos." El comentarista no estaba equivocado pues podemos imaginar el potencial que tienen los valores de la figura si tomamos en consideración que, en esa época, un tercio de los cinco millones de barriles de petróleo se enviaba diariamente a procesar mediante la reacción de desintegración catalítica.



IV. CONCLUSIONES

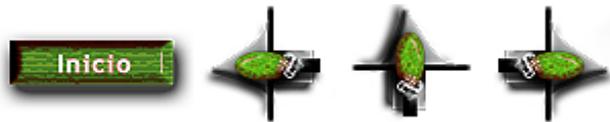
LAS arcillas modificadas han venido a sumarse al grupo de cristales porosos con que el científico cuenta actualmente para hacer una química más creadora, estimulada no sólo por el interés científico sino también por los beneficios industriales y de bienestar que ofrece.

Esta nueva química se engloba dentro de una corriente más vasta que suele llamarse "química de intercalación", es decir, la inserción de una especie química en la estructura de un sólido con la consecuente modificación físico-química de la especie aceptadora.

Los compuestos de intercalación se encontraban en la naturaleza, sobre todo en minerales como las arcillas, mucho antes de que el hombre se interesara en ellos. La idea de intercalación se ha extendido a otros compuestos naturales y artificiales, entre ellos la molécula del ADN, que contiene el patrimonio hereditario de los seres vivos. Actualmente se estudian compuestos de intercalación en el ADN que eviten su réplica o transcripción con propósitos terapéuticos; también se desarrollan sustancias que forman complejos coloridos con los cromosomas, lo que permite su identificación más precisa.

Se puede visualizar que, en los campos de la catálisis y la separación selectiva de los componentes, los cristales porosos se acercan cada día más al momento en que logren mimetizar la acción de las enzimas, que como sabemos son materiales biológicos de elevada especificidad en sus funciones.

Es de esperarse que los desarrollos de las investigaciones en curso en muchos laboratorios del mundo dedicados a la química de intercalación, depararán en el futuro beneficios que sobrepasan nuestra imaginación.



LECTURAS RECOMENDADAS

M. Bauer y L. García Colín (coordinadores), *Energía en México en el arranque del siglo XXI*. El Colegio Nacional, México, 1989.

J. D. Bernal, *The Physical Basis of Life*. Routledge y Paul Kegal, Londres, 1951.

P. Bosch e I. Schifter, *La zeolita. Una piedra que hierve*. Colección La Ciencia desde México, núm. 55, Fondo de Cultura Económica, México, 1988.

R. J. Camacho, "Caracterización de un caolín de Veracruz y sus aplicaciones". Tesis, Facultad de Química de la UNAM, 1985.

C. A. Córdoba, "Algunas propiedades fisicoquímicas en arcillas mexicanas". Tesis, UNAM, México, 1988.

S. Coria, "Análisis fisicoquímico y mineralógico de las arcillas del valle de México". Tesis, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, México, 1976.

B. Davis y W. Hettinger (compiladores), "Heterogeneous Catalysis: Selected American Stories". *ACS Symposium Series*, 222, Washington, EUA, 1983.

G. L. de Pablo, "Las arcillas. 1.- Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo XXVII, 2, 49-92, México, 1964.

S. Fuentes y G. Díaz, *Catalizadores ¿La piedra filosofal del siglo XX?* Colección La Ciencia desde México, núm. 59, Fondo de Cultura Económica, México, 1989.

B. Gómez, "Análisis de las arcillas del subsuelo de la ciudad de México". Tesis, Facultad de Química de la UNAM, 1987.

R. Marsal y M. Mazari, "El subsuelo de la ciudad de México". Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1969.

M. Paecht-Horowitz, *Angewandte Chemie*, 12, 5, 349, (1973). "Origen del petróleo", en *Memorias del VII Congreso Mundial del Petróleo*. México, 1967.

"Origin of Petroleum", *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. Selected Papers, 1950-1969 A. A. P. G., Reprint Series, núm. 1, 1969.

J. Welton, *SEM Petrology Atlas*. Chevron Oil Field Research Company, EUA, 1984.



CONTRAPORTADA

Entre los siglos XVI y XVII, la porcelana china fue llevada a Europa donde creó una pasión casi enfermiza. Los grandes nobles se peleaban la posesión de piezas tan valiosas. Los chinos las llamaban Ling Lung, que significa "trabajo del Diablo", para indicar que iban más allá de la habilidad humana. En uno de los centros de fabricación en China trabajaban 180 mil familias en 3 mil hornos, y algunos trabajos especiales pasaban de una generación a otra para ser terminados. Destreza sobrehumana, un caolín muy cristalino y paciencia infinita empleaba el artesano chino, más otros secretos revelados en este libro. Por supuesto, la materia básica era la arcilla, como lo es de toda la cerámica que fabrica el hombre.

Las arcillas son definidas como cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consta de un material granuloso muy fino, formado por partículas cuyo tamaño es inferior a cuatro micras —la dimensión aproximada de un microbio común. La arcilla es un material ampliamente conocido: el barro natural ha sido utilizado por el hombre en la construcción de habitaciones y, por supuesto, en la alfarería, pero, mediante la lectura de este libro, veremos cómo, mediante la ingeniería molecular, se la transforma en arcilla pilareada y en un reactor molecular donde se alojan y reaccionan las moléculas de petróleo para convertirse en gasolina. Se observará también el papel que, consideran los científicos, las arcillas desempeñaron como protagonistas en el origen de la vida sobre la Tierra.

El propósito de este libro, según sus autores, es demostrar cómo es este polvo tan familiar, la manera cómo es posible conocerlo aún más y modificarlo en provecho del hombre y, en especial, cómo está relacionado con nuestra vida cotidiana. Pese a su cotidianeidad, las arcillas son minerales que se formaron hace millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra.

El doctor J. M. Domínguez es físico egresado de la UNAM y en la actualidad es presidente de la Sociedad de Superficies. El doctor I. Schifter es químico de la misma institución. Ambos se doctoraron en la Universidad Claude Bernard de Lyon, Francia. Dedicados al desarrollo de materiales nuevos y catalizadores, trabajan en el Instituto Mexicano del Petróleo.

