

## LA “TIERRA”: UN MATERIAL COMPUESTO

### “SOIL”: A COMPOSITE MATERIAL



Juan Carlos Calderón Peñafiel

Universidad del Azuay

Ecuador

Ph.D. especialista en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo. En el ámbito académico ha obtenido el Título Universitario Oficial de Doctor, otorgado por la Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, dentro del Programa de doctorado de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo. Ha adquirido el Título Universitario Oficial de Máster en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo, otorgado por la Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. Es arquitecto por la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca. Ha sido parte del Grupo Interdisciplinar de Ciencia y Tecnología en la Edificación GICITED y ha formado parte del Laboratorio de Materiales EPSEB-UPC en Barcelona-España. Es autor de diferentes publicaciones y ha sido conferencista internacional. Actualmente es docente de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Azuay. En el ámbito profesional, en la ciudad de Cuenca-Ecuador, ha formado parte de equipos de trabajo en entidades públicas diseñando proyectos de interés social y espacios colectivos. Ha formado parte del Departamento de Planificación Arquitectónica de la Universidad de Cuenca y del equipo de diseño del Campus Universitario “Balzay”. Actualmente ejerce la práctica profesional autónoma como parte del grupo interdisciplinar ArquitecturaTierra, del cual es fundador.

[jccalderon@uazuay.edu.ec](mailto:jccalderon@uazuay.edu.ec) / [arq.juancarloscalderon@gmail.com](mailto:arq.juancarloscalderon@gmail.com)

[orcid.org/0000-0002-1475-4239](https://orcid.org/0000-0002-1475-4239)

Fecha de recepción: 04 de marzo, 2021. Aceptación: 21 de abril, 2021.

## Resumen

La problemática ambiental ha impulsado la investigación de materiales alternativos que ayuden a aminorar el impacto derivado de la construcción. En este contexto, la "tierra" y los materiales a base de arcilla sin cocer se han presentado como una alternativa interesante a materiales convencionales que incorporan gran cantidad de energía. Pese a que existe una creencia generalizada de que la "tierra" y los materiales a base de arcilla cruda están bien entendidos, mediante el estudio del estado del arte en lo referente a los antecedentes históricos, los limitantes, la innovación del material, sus características y composición, se expone la complejidad que conlleva su estudio y correcta aplicación. Se puede decir que "tierra" es un nombre genérico que se da al material compuesto por diferentes tipos de silicatos. Estos minerales tienen características y propiedades específicas de acuerdo a su estructura y composición química molecular. Entre los silicatos, las arcillas contienen nanopartículas responsables de conglomerar el resto de constituyentes gracias a sus características y, por tanto, son consideradas componentes fundamentales para la exploración e innovación del material. En la actualidad la combinación de modernas técnicas de análisis permite una mayor comprensión de la composición y estructura de la "tierra" y la arcilla. Estos avances han provocado el desarrollo de tecnologías que permiten optimizar los materiales de arcilla tomando en cuenta las características microscópicas mediante procesos microbiológicos; nanotecnología, geopolimerización, activación alcalina, etc.

## Palabras clave

Construcción con tierra, tierra, arcilla, innovación, composición.

---

## Abstract

The environmental problem has prompted research into alternative materials that help reduce the impact from construction. In this context, soil and raw clay-based materials have emerged as an interesting alternative to conventional materials that incorporate a large amount of energy. Although there is a widespread belief that soil and raw clay-based materials are well understood, through the study of the state of the art in relation to the historical background, the limitations, the innovation of the material, its characteristics and composition, the complexity involved in its study and correct application is exposed. It can be said that soil is a generic name given to the material composed of different types of silicates. These minerals have specific characteristics and properties according to their structure and molecular chemical composition. Among the silicates, clays contain nanoparticles responsible for conglomerating the rest of the constituents thanks to their characteristics and, therefore, they are considered fundamental components for the exploration and innovation of the material. Nowadays, the combination of modern analysis techniques allows a better understanding of the composition and structure of soil and clay. These advances have led to the development of technologies that allow the optimization of clay materials taking into account the microscopic characteristics through microbiological processes; nanotechnology, geopolymerization, alkaline activation, etc.

## Keywords

Construction with soil, soil, clay, innovation, composition.

## Introducción

La “tierra”, material comúnmente conocido con el nombre de suelo, barro, lodo y diversos coloquialismos que dependen de los dialectos geográficos, se ha definido tradicionalmente como la parte no pétreo de la corteza terrestre que se puede excavar sin explosivos (Torrijo y Cortés, 2007). En la arquitectura, la “tierra” es entendida como el material que se obtiene del suelo y está compuesto por diferentes minerales que tienen como principal conglomerante la arcilla. Esta última permite fabricar elementos constructivos que se moldean en estado plástico y endurecen al secarse.

La gran disponibilidad de arcillas a nivel mundial es la principal razón por la que la “tierra”, a lo largo de la historia, se ha convertido en el material de construcción más utilizado. El Departamento de Energía de los Estados Unidos estima que más de la mitad de la población global continúa viviendo en casas de “tierra” sin cocer construidas con tecnologías vernáculas: adobe, “tierra” apisonada, bahareque, etc., (Avrami, Guillaud y Hardy, 2008), mientras que cifras de la UNESCO señalan que son más de dos mil millones de personas y aproximadamente 10% de edificaciones del patrimonio mundial arquitectónico (Eloundou y Joffroy, 2013).

De cualquier forma, estos datos evidencian que la tendencia marcada en el pasado por el uso común de la “tierra” cruda en la construcción, cambió a partir del advenimiento de los materiales y la arquitectura moderna. La “tierra” con la arcilla como conglomerante principal, poco a poco ha sido y es desplazada por materiales procesados. En las últimas décadas la problemática ambiental ha provocado un resurgimiento en el interés de tecnologías de construcción a base de arcilla sin cocer que en esencia siguen, mayoritariamente, aplicándose mediante los mismos principios utilizados milenios atrás.

Aunque existe la creencia generalizada de que la “tierra”, como material de construcción, ha sido ampliamente estudiada y que se han agotado las posibilidades del material, las nuevas tecnologías, métodos de análisis y producción aplicables a la arquitectura y la construcción, han evidenciado que los materiales a base de arcilla tienen un futuro prometedor.

Considerando que el éxito del uso de la “tierra” como material de construcción depende de una correcta aplicación basada en el conocimiento del material y que, actualmente, muchas escuelas de arquitectura se han enfocado únicamente en el estudio de materiales industrializados como el hormigón y el acero, el propósito de este artículo es doble: en primer lugar, analizar el rol de los materiales de construcción a base de arcilla sin cocer (comúnmente denominados “tierra”) mediante una reseña histórica y un análisis de limitantes e innovaciones tecnológicas del material; en segundo lugar, realizar un acercamiento al material considerando sus componentes, propiedades, clasificación granulométrica y clasificación mineralógica.

### Antecedentes históricos

Los antecedentes histórico-tecnológicos de la construcción con “tierra” han sido poco estudiados. En la mayoría de los casos ha sido difícil identificar ruinas en contexto arqueológico (Pastor, 2016). La mayor parte de las edificaciones de “tierra” construidas en la antigüedad, al terminar su ciclo funcional, con la ayuda del hombre o de los agentes climáticos, se desintegraron y volvieron a formar parte de la naturaleza. Esto ha repercutido en una

pérdida irreversible de información de la arquitectura y las técnicas constructivas empleadas por las civilizaciones antiguas que activamente usaron la “tierra” como material de construcción. Los vestigios más antiguos registrados hasta ahora están en el suroeste de Asia, en la región de la actual Irán, Irak, Jordania, Siria, Israel, Líbano y Turquía. En estos lugares se ha encontrado evidencia arqueológica de edificaciones permanentes que datan de hace más de 10.000 años atrás (Schroeder, 2016).

Diferentes técnicas y métodos de construcción se desarrollaron por influencia directa del clima, la vegetación y las condiciones geológicas y tecnológicas de cada región. En lugares en donde han existido abundantes fuentes de madera o piedra, la "tierra" ha sido utilizada en sistemas de construcción mixtos, modelos tectónicos y estereotómicos, mientras que en lugares en los que la madera o la piedra han sido escasos, la "tierra" ha sido empleada para la conformación de estructuras portantes y envolventes, modelos estereotómicos.

Los constructores de la antigüedad aprovecharon la ventaja de preparar piezas de tamaño reducido y perfeccionaron el proceso de compactación y secado. Además, el uso de materiales como la paja y otros "estabilizantes naturales", se incorporaron mediante un proceso paulatino de experimentación de la técnica.

De cualquier modo, la historia ha demostrado que los avances tecnológicos en la construcción con "tierra" o barro crudo, al no garantizar réditos justificables para la industria y al haber sido relegados al olvido por parte de la academia, no fueron suficientemente rápidos y eficaces para satisfacer las crecientes demandas de la arquitectura y la construcción en función del tiempo moderno. Con el paso de los años la "tierra" fue desplazada por materiales procesados que alcanzaban resistencias similares a la piedra y podían moldearse previamente. Un claro ejemplo de este fenómeno fue la fabricación de ladrillos de arcilla cocida que, desde el punto de vista de la resistencia mecánica, la resistencia a la humedad y a otros agentes, constituyó un avance en la tecnología de la construcción. Las propiedades cerámicas que adquiría la arcilla al ser sometida a altas temperaturas fueron conocidas desde hace más de 5.000 años, pero no fue sino hasta la revolución industrial que la producción y uso del ladrillo cerámico se masificó a una escala sin precedentes, desplazando a la piedra y a los bloques de arcilla cruda (adobes) y convirtiéndose en el mampuesto más utilizado.

El arribo de los materiales modernos (encabezados por el hormigón y acero) patrocinaron una nueva

concepción de los modelos arquitectónicos y urbanos en los que la "tierra" cruda, como material de construcción, parecía no tener cabida. El hormigón se convirtió en el material de construcción más utilizado en el mundo y la academia (en especial disciplinas como la Arquitectura y la Ingeniería) volcó su atención hacia los materiales industrializados.

A partir de la década de 1970, con el advenimiento de la problemática medioambiental, un minoritario grupo de actores de la construcción retomaron el interés por el uso y el estudio de la "tierra". Un ejemplo de este tipo de iniciativas fue la conformación de CRAterre que, desde 1979, ha destacado como una de las principales organizaciones dedicadas a la investigación y divulgación de conocimiento, con énfasis en la recuperación y difusión de técnicas tradicionales de construcción con barro.

### Limitantes

La resistencia mecánica y la humedad son las razones principales por las cuales la "tierra" cruda adolece de una imagen deficiente, no cumple con algunos estándares de productividad y calidad y no pasa muchas de las pruebas de durabilidad y requerimientos técnicos superados por materiales industriales (Damme y Houben, 2017).

Las estructuras a base de barro expuestas a la lluvia o la humedad son propensas a erosión y al fácil deterioro de sus superficies, además, en modelos constructivos deficientes, al agrietamiento ante pequeños esfuerzos de tracción y/o compresión y a un crítico comportamiento ante acciones dinámicas en zonas sísmicas (Miccoli, Müller y Fontana, 2014). La historia ha demostrado que pueblos enteros han sido destruidos por inundaciones (Guetala, Abibsi y Houari, 2006) y terremotos (Blondet y Aguilar, 2007).

### Innovación tecnológica: la "tierra" como material contemporáneo

En países en los que más se usa la arcilla cruda como material de construcción, gran parte de las técnicas aplicadas en la actualidad no han sido

modificadas o innovadas sustancialmente. El adobe, la tapia, el cob, el bahareque, la quincha, etc., siguen fabricándose y utilizándose con los mismos principios empleados durante milenios.

Hay pocos registros de innovación de la "tierra" como material. Como ejemplos pueden señalarse el desarrollo de máquinas diseñadas para comprimir bloques de "tierra" (BTC), la implementación de métodos de encofrados para muros de "tierra" apisonada y el uso de diferentes tipos de estabilizantes (Minke, 2009).

Hasta ahora, los principales actores en el ámbito de la construcción con "tierra" (CRATERRE, ICOMOS, ISCEAH, WHEAP, RED PROTERRA, etc.) han puesto especial énfasis en la recuperación y difusión de técnicas tradicionales con programas de rehabilitación del patrimonio y ayuda social en diferentes países y sectores en vías de desarrollo. En una escala menor y menos fructífera se ha trabajado en la innovación de mecanismos de optimización de la técnica y la materia prima, en algunos casos, implementando tecnologías complementarias y sistemas de construcción mixtos.

De hecho, en la mayoría de ocasiones, la innovación tecnológica actual viene dada por el uso de herramientas, máquinas, materiales auxiliares y tecnologías que son incorporadas y que se utilizan para la optimización del material, el elemento constructivo y/o el sistema constructivo según cada caso. A continuación, el análisis de la innovación de la construcción en "tierra" se divide en dos partes. Por un lado, se examina la innovación de elementos de construcción y sistemas constructivos y, por otra, la innovación o estabilización de la materia prima (la "tierra").

### Innovación de elementos y sistemas de construcción

En el caso de mampuestos de barro crudo la innovación ha consistido en pasar del moldeado manual del bloque a moldearlo mediante el uso de prensas mecánicas que garanticen una mejor compactación, por ejemplo, el BTC (Calderón, 2013). Algo similar ha ocurrido con los bloques o elemen-

tos extrusionados (Heath, Walker, Fourie y Lawrence, 2009) que, mediante el uso de máquinas extrusoras, en algunos casos, han garantizado una mejor productividad y control de calidad del producto final.

En el caso de la tapia el uso de martillos neumáticos y sistemas de encofrado moderno han ayudado notablemente a reducir los tiempos de producción y a garantizar la calidad de compactación del material (Maniatidis y Walker, 2003). Además, con el uso de estas tecnologías complementarias ha sido posible producir elementos prefabricados de "tierra" compactada de diferente tamaño y formato (Pan, 2012). En el caso de las estructuras con entramados de fibras, la proyección de barro mediante compresores y dispersores ha servido para aminorar los tiempos de fabricación y controlar los acabados (Minke, 2009). En definitiva, la tecnología contemporánea (máquinas y herramientas) han facilitado las acciones de modelar, cortar, comprimir, apilar, verter, mezclar, excavar, cubrir, rellenar, revocar, etc., la "tierra".

Por otra parte, la "tierra" y los elementos de construcción de "tierra" han empezado a utilizarse en sistemas de construcción mixtos. Así, el "BTC anti-sísmico", el "adobe anti-sísmico", "la tapia anti-sísmica", la "quincha metálica", "los elementos de tierra con refuerzo de hormigón", los "elementos de tierra con refuerzo metálico", "los elementos de tierra con aislamiento y/o calefacción incorporada", forman parte de un gran abanico de tecnologías híbridas de construcción con barro (Hall, Lindsay y Krayenhoff, 2012). Es decir, se han empezado a utilizar tecnologías constructivas y materiales complementarios como estrategias de apoyo e "innovación" que permitan garantizar un mejor desempeño mecánico y de resistencia en general.

### Innovación del material

La búsqueda de estrategias para dotar de características más resistentes a la "tierra" como material de construcción, se remonta a la prehistoria (Houben y Guillaud, 1994). Productos como la orina, la sangre, el estiércol, la goma arábiga, el jugo de

agave, el betún natural, la caseína proveniente de la leche, las fibras vegetales y animales, la arena, el yeso, la cal, las cenizas, las puzolanas, etc., son ejemplos de algunos estabilizantes de arcilla utilizados empíricamente por constructores de todos los tiempos (Minke, 2001).

Actualmente los estabilizadores de la "tierra" de uso más frecuente son el cemento, la cal y el betún que comúnmente se agregan en proporciones que van del 5 a 15% en peso (Gallipoli, Bruno, Perlot y Mendes, 2017). De estos, el cemento es el más utilizado, aunque estudios recientes no recomiendan su empleo y evidencian problemas inherentes a incompatibilidad e impacto ambiental (Damme y Houben, 2017).

Pese a los esfuerzos señalados, los bloques de "tierra" cruda, normalmente, alcanzan resistencias a la compresión que oscilan entre 0,39 MPa para bloques sin estabilizar y 6,5 MPa para bloques estabilizados con 20% de cemento (Alam, Naseer y Shah, 2015). Estas cifras están muy por debajo de la resistencia estándar del hormigón a base de cemento Portland o ladrillos cerámicos modernos (iguales o mayores a 20 MPa).

En los últimos años, las advertencias sobre el cambio climático y los problemas derivados del calentamiento global captaron el interés de actores de la construcción y universidades en todo el mundo. Esto ha repercutido en el estudio científico de mecanismos de estabilización de la arcilla para su utilización como material de construcción moderno (Venkatarama y Latha, 2014). Investigaciones sobre la influencia de agregados de plantas y fibras, mezclas con cal, uso de cenizas, adición de cemento, uso de metacaolín, uso de residuos industriales, etc., son muestra de un gran abanico de estudios llevados a cabo en los últimos años que, aún no se han visto sustancialmente reflejados en la arquitectura y la construcción.

En la actualidad la combinación de modernas técnicas de análisis permite una mayor comprensión de la composición y estructura de la "tierra" y la arcilla. Estos avances han provocado el desarrollo de tecnologías que permiten optimizar los materia-

les de arcilla tomando en cuenta las características microscópicas mediante procesos microbiológicos (Achal, Mukherjee, Kumari y Zhang, 2015); nanotecnología (Pacheco, Diamanti, et. al., 2013); geopolimerización (Provis, van Deventer, 2009); activación alcalina (Pacheco, 2015); etc.; convirtiéndose en herramientas que han definido los nuevos horizontes en el desarrollo de estos materiales. De hecho, los minerales de arcilla empiezan a ser entendidos como "nanomateriales naturales" que pueden dispersarse como partículas de unidades de tamaño nanométrico para formar fases poliméricas formando nuevos materiales.

A continuación, se expone un primer acercamiento al material con el afán de recalcar algunas características básicas que deben ser tomadas en cuenta para la aplicación de la "tierra", en estado natural, como material de construcción.

### Acercamiento al material

La "tierra" es un material compuesto por diferentes elementos y su composición depende de varios factores que son el resultado de un largo proceso de formación. Los suelos se diferencian según sus partículas que varían en tamaño y/o estructura mineral y/o química, dotando al material de propiedades específicas. Esto lo convierte en un material complejo que, al contrario de la creencia popular, requiere un minucioso estudio para su correcta caracterización, aplicación y/o innovación.

- **Componentes de la "tierra"**

#### *Componentes gaseosos*

La "tierra" normalmente contiene aire en las cavidades libres entre partículas sólidas y líquidas. Generalmente los componentes del aire son nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y en algunos casos metano. El aire no aporta a la resistencia, al contrario, contribuye a la porosidad y reduce la densidad del material. Los orificios vacíos ocupados por aire pueden ser ocupados por agua en forma de vapor.

### *Componentes líquidos*

El principal líquido constituyente del suelo es el agua y algunas sustancias disueltas en ella tales como azúcares, alcohol, ácidos, bases y sales. Generalmente en la naturaleza, el constituyente líquido proviene de la lluvia o de fuentes naturales de agua. El agua puede cambiar las propiedades físicas del barro. Activa la capacidad aglutinante de la arcilla y dota al material de la plasticidad necesaria para su manipulación. Existen diferentes tipos de agua presentes en la "tierra": agua de cristalización o agua estructural, agua absorbida y agua capilar o agua de poros. El agua estructural está químicamente enlazada y se elimina calentando la "tierra" a temperaturas que pueden ir de 400°C a 900°C. El agua absorbida y capilar se elimina a temperaturas que van desde 50°C a 120°C (Minke, 2009). Como es bien sabido, la "tierra", con la arcilla como principal conglomerante, si se humedece se expande y si se seca se contrae debido a sus características mineralógicas y químicas.

El efecto que produce el agua repercute directamente en varias propiedades de la "tierra", de ellas, las más representativas son: cohesión, expansión del material, contracción, plasticidad, y la función que cumple como disolvente de diferentes elementos como Na<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>, etc., facilitando la redistribución de sus compuestos.

### *Componentes sólidos*

Los constituyentes sólidos son insolubles en agua y se pueden dividir en constituyentes orgánicos e inorgánicos. Los componentes sólidos orgánicos representan las sustancias orgánicas provenientes de plantas y animales y pueden dividirse en: plantas y animales vivos, desechos de animales, plantas y animales en descomposición y humus. En un suelo extraído en una profundidad menor a 40cm por lo general encontraremos materia orgánica y humus. La "tierra" que se ha de utilizar como material de construcción debe estar libre de estas sustancias, pues no forman parte del material apto para construcción debido a su condición degradable.

Dentro de los componentes sólidos inorgánicos se pueden distinguir dos grupos de minerales: los minerales no degradados, que son idénticos en características a la roca de la que se derivan y constituyen las diferentes partículas minerales (arcilla, arena, grava y rocas; generalmente representan la mayor parte del suelo o "tierra"), y los minerales degradados, que son el resultado de la degradación química de los minerales de la roca original.

Al utilizar la "tierra" como material de construcción, los limos, la arena y otros agregados constituyen material de relleno. La arcilla es el principal aglomerante del resto de partículas y sus características y propiedades depende de su composición química y mineralógica.

#### • **Propiedades**

La mayoría de las propiedades del barro varían de acuerdo a los diferentes elementos que lo componen. La granulometría de dichos elementos y la estructura mineral de los componentes internos y externos juegan un papel determinante en el comportamiento y propiedades del material.

#### *Plasticidad*

La plasticidad es la propiedad que permite moldear ciertos suelos aplicando fuerzas externas y mantener las formas adquiridas aun cuando la humedad y dichas fuerzas desaparecen. Los suelos tienen diferente plasticidad dependiendo de su composición. Las arenas y los limos tienen una plasticidad baja mientras que suelos con alto contenido de arcillas tienen una plasticidad mayor debido a sus propias características.

La plasticidad de un suelo, así como los límites entre diferentes estados de consistencia, están determinados por los límites de Atterberg que define los límites de plasticidad: máximo y mínimo. Si sobrepasamos el límite máximo de plasticidad el material adquiere fluidez y pierde su capacidad de mantener la forma. Si el material tiene un porcentaje de humedad por debajo del límite mínimo de plasticidad, la masa

"terrosa" se vuelve quebradiza y no se puede moldear. La diferencia entre los dos porcentajes límites de humedad (máximo y mínimo) se llama número o índice de plasticidad (Houben y Guillaud, 1994).

### *Compactibilidad*

La compactibilidad de un suelo define su máxima capacidad para compactarse según una energía de compactación y un grado de humedad dados. A medida que aumenta la densidad de un suelo, se reduce su porosidad y puede penetrar menos agua. Esta propiedad es el resultado de la interpenetración de los granos, que a su vez resulta en una reducción del agua. La compactibilidad de un suelo se mide mediante la prueba de compactación Proctor (Houben y Guillaud, 1994).

### *Cohesión*

La cohesión de un suelo es una expresión de la capacidad de sus granos para permanecer juntos cuando se aplica un esfuerzo de tracción sobre el material. La cohesión depende de las propiedades adhesivas o de cementación del mortero que une los granos entre sí. La cohesión se mide mediante una prueba de tracción en condiciones húmedas (Houben y Guillaud, 1994).

- **Clasificación granulométrica**

Los suelos convencionalmente se clasifican según el tamaño de sus partículas que generalmente se determinan mediante el uso de tamices. Según el tamaño de partícula los componentes sólidos de la tierra o suelo se pueden clasificar en rocas, grava, arena, limo, arcillas y coloides. La proporción y distribución de estos componentes determinan la estructura, textura y a su vez las propiedades relativas de los suelos, que siempre dependerán de su composición mineralógica y química.

Los granos de un tamaño mayor de 0.06mm pueden ser apreciados a simple vista o con ayuda de una lupa; los comprendidos entre 0.06 y 2 micras, que pueden ser examinados con la ayuda del microscopio, forman la fracción fina; los menores de 2 micras constituyen la fracción muy fina y se requiere el uso del microscopio electrónico para percibir su forma y su estructura.

La mayoría de los suelos naturales contienen partículas de dos o más fracciones. Las características particulares de un suelo compuesto están principalmente determinadas por las propiedades de la fracción más fina. La fracción gruesa actúa como un agregado o parte inerte de un suelo compuesto con participación entre 80 y 90% del peso seco total, la parte decisiva o activa la constituye 10% o 20% del resto formado por los finos (Jiménez, Justo y Serrano, 1971).

Las arenas y las gravas se denominan suelos de grano grueso y los limos y arcillas, suelos de grano fino. Los suelos de grano grueso son suelos sin cohesión que exhiben plasticidad cero. Los suelos de grano fino, especialmente las arcillas, son plásticos y son la base de los materiales de construcción de "tierra". Para los suelos de grano fino la clasificación adicional se lleva a cabo utilizando un hidrómetro o un análisis de sedimentación que utiliza la ley de Stokes para la caída de partículas individuales, suspendidas de suelo de pequeño tamaño: limos y arcillas (Jiménez, Justo y Serrano, 1971).

El análisis por difracción de rayos láser (DRX) o el análisis de la distribución de tamaños de partículas mediante difracción láser (ADL) son técnicas ampliamente utilizadas para un análisis de tamaño de partículas más exhaustivo. Los instrumentos que se emplean en esta técnica son particularmente atractivos por su capacidad de analizar tamaños de partículas en el rango de 0.02 a 2.000 micras. La adquisición rápida de datos y la facilidad de verificación son dos factores importantes en comparación al análisis de sedimentación convencional (Hall et al., 2012).



- **Clasificación mineralógica**

La "tierra" es un material compuesto por diferentes tipos de silicatos que, de un lugar a otro, pueden variar en proporción, composición mineralógica, composición química y demás características.

#### *Los silicatos*

Los silicatos forman parte de la mayoría de las rocas, arenas y arcillas, de hecho 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos (Rubio y López, 2012). Su composición y estructura se relacionan directamente con la naturaleza de la roca madre y los factores ambientales que les dio origen (Domínguez y Schifter, 1995).

Los silicatos son el grupo de minerales más rico en especies. La unidad básica de los silicatos está formada por cuatro átomos de oxígeno y un átomo de silicio, por tanto, el oxígeno es el elemento más abundante de la corteza terrestre seguido por el silicio (Domínguez y Schifter, 1995).

En general, los silicatos no tienen aspecto metálico y se caracterizan por su elevada dureza. Su clasificación se establece en varios conjuntos y subconjuntos en función de su estructura, determinada en cada caso por la manera de agrupación de tetraedros ( $\text{SiO}_4$ ). En cualquier tipo de silicatos el silicio puede ser reemplazado parcialmente por el aluminio obteniéndose así aluminosilicatos (Rubio y López, 2012).

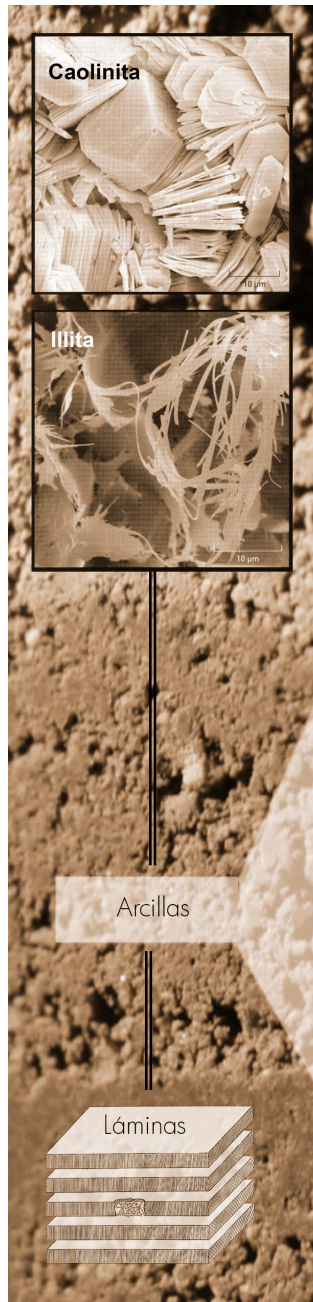
#### *Filosilicatos*

Los filosilicatos (Figura 1) se caracterizan por una estructura laminar. Los minerales arcillosos o simplemente las arcillas son filosilicatos que por sus características son de relevante importancia para la "tierra" como material de construcción y para la ciencia de materiales en general.

Las arcillas se caracterizan por estar formadas por partículas muy finas de forma aplanada y, por tanto, con una superficie específica muy elevada. Son minerales de alteración y se forman a partir de otros minerales silicatados mediante un proceso de alteración química. Otros filosilicatos que no son minerales arcillosos, tienen origen ígneo o metamórfico (Rubio y López, 2012).

Aunque es bien sabido, es importante destacar que existen diferentes tipos de arcillas que, debido a sus características mineralógicas y químicas, reaccionan de un modo particular ante a la acción de otros materiales, incluyendo el agua y diferentes tipos de estabilizantes. Por esta razón, en experimentos e investigaciones que persiguen mejorar las características resistentes de la "tierra" como material de construcción, es imprescindible una caracterización completa de la materia prima, prestando especial atención en la composición mineralógica y química, y la definición del tipo y cantidad de arcilla que aglomera el resto de partículas.

**Figura 1.** Minerales y Rocas. Recuperado de: <http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/index.php> y L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture*. Berlín, (p. 159)



La "tierra" es un material compuesto por diferentes tipos de silicatos

Clasificación de los Silicatos		
Grupo	Subdivisión	Ejemplos
Nesosilicatos	Nesosilicatos verdaderos	Olivino
		Granate
		Circón
	Subnesosilicatos	Silicatos de aluminio
		Andalucita
		Distena o Cianita
		Sillimanita o Fibrolita
		Estauroлита
	Nesosilicatos - Sorosilicatos	Esfena
Epidota		
Sorosilicatos		Epidotas
Ciclosilicatos		Berilo
		Turmalina
Inosilicatos	Piroxenos	Augita
		Hiperstena
	Anfiboles	Actinota
		Hornblenda
Filosilicatos	Familia de la caolinita	Caolinita
	Familia de las micas y de las arcillas micáceas	Serpentina
		Pirofillita
		Talco
		Muscovita
		Illita
		Biotita
		Vermiculita
		Familia de las cloritas
	Familia de la sepiolita	Sepiolita
	Familia de las arcillas desordenadas	Halloysitas
Esmeectitas		
Tectosilicatos	Minerales de Sílice	Cuarzo
		Ópalo
	Feldespatos	Monoclínicos u
		Triclínicos o
	Feldespatoides	Nefelina
		Leucita

De Rubio, S. A., & Lopez, M., (2012).

## Conclusiones

El atractivo de la "tierra" y de la arcilla, en el ámbito de los materiales de construcción, radica en su bajo impacto ambiental, su disponibilidad y sus propiedades. Pese a que los materiales a base de arcilla cruda han sido los más utilizados en la historia de la humanidad, paulatinamente han sido y son reemplazados por materiales de construcción procesados e industrializados. La innovación tecnológica en sistemas y elementos de construcción con "tierra" ha consistido, principalmente, en la implementación de nuevas herramientas, máquinas y la utilización de sistemas de construcción híbridos. En la actualidad, en la mayoría de los casos, la innovación del material y las técnicas de construcción con "tierra" no han variado sustancialmente en comparación con las técnicas ancestrales.

Al investigar materiales "térreos" con la intención de mejorar o evaluar características tales como el comportamiento mecánico, el comportamiento frente a la humedad, al fuego, etc., es imprescindible caracterizaciones que vayan más allá de la tradicional clasificación granulométrica que, si bien es importante, por sí sola no nos permite identificar a cabalidad el material de estudio. A más de los tamaños de grano de los componentes de la "tierra", es imprescindible una caracterización mineralógica y química, pues depende de estas singularidades su reacción ante otros agentes.

Se puede decir que "tierra" es un nombre genérico que se da al material compuesto por diferentes tipos de silicatos. Estos minerales tienen características y propiedades específicas de acuerdo a su estructura y composición química molecular. En la actualidad, su entendimiento, ha hecho posible explicar y optimizar los métodos de estabilización de la "tierra" utilizados durante milenios de manera empírica y, además, proponer alternativas de innovación.

Tal como sucede con los nanomateriales, las técnicas contemporáneas de análisis de los componentes de la "tierra" evidencian una correlación directa entre el comportamiento de sus partes a nivel microscópico y el comportamiento del material a nivel macroscópico.

Para proponer estrategias de optimización e innovación del material, más allá de una clasificación granulométrica, es necesario, como punto de partida, entender las estructuras mineralógicas y químicas de los diferentes componentes de la "tierra". Además, es imprescindible tener presente que, al igual que sucede con el cemento Portland en el hormigón convencional, las arcillas constituyen el aglomerante principal del resto de partículas de la "tierra".

Hoy, la combinación de modernas técnicas de análisis permite y facilita una mayor comprensión de la composición y estructura de la "tierra" y la arcilla. Estos avances han provocado el desarrollo de tecnologías que permiten optimizar los materiales de arcilla tomando en cuenta las características microscópicas mediante procesos microbiológicos, nanotecnología, geopolimerización, activación alcalina, etc., convirtiéndose en herramientas que han definido los nuevos horizontes en el desarrollo de estos materiales. De hecho, los minerales de arcilla empiezan a ser entendidos como "nanomateriales naturales" que pueden dispersarse como partículas de unidades de tamaño nanométrico para formar fases poliméricas formando nuevos materiales.

## Referencias

- Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D., & Zhang, Q. (2015). *Earth-Science Reviews Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications*. *Earth Science Reviews*, 148, 1–17. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>.
- Alam, I., Naseer, A., Shah, A. A. (2015). *Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas*. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>
- Avrami, E., Guillaud, H., Hardy, M. (2008). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. (A. Escobar, Ed.). Los Angeles: Institute, The Getty Conservation. [https://getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/terra\\_lit\\_review.pdf#page=34](https://getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terra_lit_review.pdf#page=34). p Xi.
- Blondet, M., & Aguilar, R. (2007). *Seismic Protection of Earthen Buildings*. In Conferencia Internacional en ingeniería sísmica. (pp. 482–777). Lima. <http://www.cismid.uni.org>
- Calderón P., J. C. (2013). *Tecnologías para la fabricación de bloques de tierra de gran resistencia*. Tesis de máster. Tecnología de la Arquitectura la Edificación y el Urbanismo. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). *Earth concrete. Stabilization revisited*. *Cement and Concrete Research Journal*.
- Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). "Las arcillas: el barro noble" en: *La ciencia para todos*. [en línea] México: Fondo de Cultura Económica, vol.3: Química. 17/07/2018: <https://bit.ly/2zL97zT>
- Eloundou, T. Joffroy. (2013). *Earthen Architecture in today's World*, in Proceedings of the UNESCO International Colloquium on the Conservation of World Heritage Earthen Architecture, UNESCO Publishing, Paris, [www.whc.unesco.org/en/series/36/](http://www.whc.unesco.org/en/series/36/).
- Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of *raw earth building*. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463–478. <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). *Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure*. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119–127. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>
- Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). *Modern earth buildings: materials, engineering, construction and applications*. (ELSEVIER, Ed.) (1st Edition). Woodhead Publishing.
- Heath, A., Walker, P., Fourie, C., & Lawrence, M. (2009). *Compressive strength of extruded unfired clay masonry units*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 162(3), 105–112. <http://doi.org/10.1680/coma.2009.162.3.105>
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: a comprehensive guide*. London: Intermediate Technology Publications. [http://catalag.upc.edu/record=b1189617~S1\\*cat](http://catalag.upc.edu/record=b1189617~S1*cat) pp. 73-103
- Jiménez Salas, J. A., Justo Alpañés, J. L., & Serrano González, A. A. (1971). *Geotécnia y cimientos*. Madrid: Rueda. p. 14
- Maniatidis, V., & Walker, P. (2003). *A Review of Rammed Earth Construction*. In D. of A. & C. Engineering (Ed.), DTI Project Report (p. 80). Bath: University of Bath. <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/a-review-of-rammed-earth-construction>
- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). *Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*. *Construction and Building Materials*, 61, 327–339. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>

- Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura tradicional*. Montevideo: Nordan-Comunidad. [http://catalog.upc.edu/record=b1323040~S1\\*cat](http://catalog.upc.edu/record=b1323040~S1*cat) pp. 47-59
- Minke, G. (2009). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Basel [etc.]: Birkhäuser. [http://catalog.upc.edu/record=b1360313~S1\\*cat](http://catalog.upc.edu/record=b1360313~S1*cat), 72-76
- Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub
- Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. N. et. al. (2013). *Nanotechnology in eco-efficient construction*. (Woodhead Publishing Limited, Ed.).
- Pan, W. (2012). *Prefabrication and Automation in Rammed Earth Building Construction*. In Proceedings of the CIB IAARC W119, Workshop 2012 (pp. 57-61). Munich, Germany. <https://bit.ly/2FkddBx>
- Pastor Quiles, María (2016). *Aproximación al estudio arqueológico de la construcción con tierra y a su aplicación a la arquitectura prehistórica*, V Jornadas de Investigación de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Alicante. Universidad de Alicante. Facultad de Filosofía y Letras. Alicante.
- Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.
- Rubio, S. A., & Lopez, M. (2012). *Minerales y Rocas*. Recuperado en octubre 2016 de: <http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/index.php>
- Schroeder, H. (2016). *Sustainable Building With Earth* (Springer). Switzerland. p. 02
- Torrijo Echarri, F. J., & Cortés Gimeno, R. (2007). *Los suelos y las rocas en ingeniería geológica: herramientas de estudio*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. p. 05
- Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). *Retrieving clay minerals from stabilised soil compacts*. Applied Clay Science, 101, 362-368. Recuperado en octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.08.027>