Arcillolita Cinerítico
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Arcillas

Orlando Pulido González

Citación: Pulido, O. (2019). Arcillas. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano

A lo largo de la historia, las arcillas han sido los materiales naturales preferidos por el hombre para elaborar diversos utensilios, que le ha permitido idear objetos, en principio para el consumo de alimentos y para almacenar líquidos, y posteriormente para fabricar porcelanas, ladrillos y baldosas. En la actualidad existen muchas otras aplicaciones diferentes de las usuales; por ejemplo, en los materiales poliméricos se incluyen arcillas con el objeto de que adquieran propiedades mecánicas mejoradas, como la resistencia a las llamas y al desgaste.

Petrológicamente, las arcillas son rocas sedimentarias producto, en ciertos casos, de meteorización de agentes atmosféricos o de procesos hidrotermales; en general, su origen es detrítico, con unas características bien definidas. Por otro lado, sedimentológicamente se definen con un término granulométrico que involucra sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 µm (micrones); sin embargo, para otros (Rusia) son representativas de arcillas y minerales arcillosos las fracciones menores de 0.5 a 1 µm, y para otros, entre 1 y 4 µm. El material arcilloso es importante, ya que representa el 67 % en volumen incluido en la litósfera y conforma el 70 % del material sedimentario (Thorez, 2005).

En el sentido mineralógico, la arcilla está constituida por filosilicatos hidratados como moscovita, sericita, biotita, clorita, talco y pirofilita; además, por minerales arcillosos como illita, clorita, vermiculita, esmectita y caolinita. Incluye también los otros silicatos, como el cuarzo, feldespatos, piroxenos y anfíboles, y también compuestos y elementos metálicos como el silicio, aluminio y el hierro, orgánicos como sulfatos, carbonatos y sales y, por último, algunos minerales opacos (Thorez, 2005).

Las propiedades de las arcillas tienen incidencia directa en sus aplicaciones industriales; entre esas propiedades sobresalen su estructura laminar, alta plasticidad, tamaño de partículas micrométricas, posibilidad de hinchamiento al humedecerse con agua o compuestos orgánicos, endurecimiento a la cocción, capacidad de cambio de cationes y concentración en la fracción coloidal (Thorez, 2005).

Las arcillas son materiales terrosos, de grano fino, plásticas, cohesivas, de textura suave. Entre sus características se destaca la plasticidad, que la adquiere cuando es mezclada con agua; por el contrario, cuando se encuentra seca es rígida, y la cocción por encima de los 1000 °C le confiere dureza y sonoridad.

Las impurezas de las arcillas afectan sus propiedades. Así por ejemplo, la presencia de cuarzo disminuye su plasticidad, la alúmina permite que la arcilla sea refractaria, y el contenido de óxidos de hierro facilita su uso en cerámicas rojas.

Existen en la naturaleza arcillas que se caracterizan por presentar colores diferentes, como las abigarradas, violáceas, amarillentas, pardas y grises. Las de color negro se caracterizan por un elevado contenido de materia orgánica, así como por la presencia de minerales que reflejan su génesis en medios anaerobios y reductores; las verdes se caracterizan por la presencia de glauconita o clorita, y las rojas por el contenido de óxidos de hierro (Corrales *et al.*, 1977).

El empleo de las arcillas depende de las características propias de cada una, derivadas de su composición, tamaño de grano y origen. Por ello, pueden emplearse para la obtención de ladrillos, tejas, cerámicas, productos refractarios, productos porcelánicos, papelería, pinturas, alimentos, etcétera.

Es importante el grado de fusibilidad. Algunas arcillas tienen su punto de fusión a los 1000 °C, y las arcillas refractarias, a los 1400 °C. Estas adquieren unas características propias especialmente útiles para diferentes aplicaciones; entre esas cualidades está el color, que se torna más uniforme, y en ocasiones puede modificarse; su resistencia a la acción de los ácidos es más fuerte; pueden adquirir la propiedad de aislantes eléctricos, acústicos y térmicos, y su resistencia mecánica es mayor. A esta última temperatura se observan los primeros indicios de vitrificación, que le confieren una mayor semejanza a la textura del vidrio (Núñez, 1987).

1. Usos

Los usos y aplicaciones industriales de las arcillas dependen de sus propiedades naturales. Con base en sus atributos, se pueden utilizar así:

- Por sus propiedades térmicas, en la fabricación de cementos refractarios, como catalizadores y como moldes de fundición.
- Por sus propiedades de absorción y de color tienen aplicaciones en curtidos, pigmentos colorantes y pesticidas; en productos farmacéuticos, sobre todo en la elaboración de medicamentos, por ser químicamente inerte y libre de bacterias; en la industria de cosméticos es uno de los principales componentes, puesto que absorbe la humedad y mejora las bases blancas para dar coloración, aparte de que se adhiere a la piel, dando una textura suave.
- En la industria cerámica, en la producción de loza, porcelana sanitaria, artículos refractarios, gres, alfarería, electroporcelana, ladrillos comunes y tejas, en la elaboración de cemento refractario y en cajas de arcilla refractaria para cocer alfarería fina.
- Por sus propiedades geológicas, se usan como material de adherencia en fundición y para ruedas abrasivas (Rodríguez, 2002).
- Por sus propiedades químicas se utilizan en la industria química para elaborar productos como sulfato de aluminio, alúmina y alumbre, en la del cemento por su resistencia a los ácidos, y en petroquímica.
- En la industria plástica se emplean como relleno en hules y plásticos, como auxiliares en procesos de filtración, en revestimientos plásticos para ductos y tejas plásticas. Se mezclan bien con oleorresinas en plásticos y mejoran la rigidez y la dureza de estos.
- En la industria del papel se utilizan como "carga" y recubrimiento de este; igualmente, se usan en el acabado del papel de arte y tapiz y en el papel corrugado; además, reducen la porosidad y dan suavidad y brillo a la superficie del papel.
- Asimismo, se utilizan en las industrias de caucho, lápices, pinturas, insecticidas, tintas, cueros, jabones, mezclas termoplásticas para techar y productos de asbesto.

A continuación se relacionan los tipos de arcillas presentes en el mercado.

1.1. Arcillas industriales

Las arcillas usadas en la fabricación de materiales para la construcción y agregados se conocen como *arcillas comunes, arcillas cerámicas o arcillas para la construcción*. Estas arcillas están constituidas comúnmente por illita y esmectita, y por mezclas de minerales arcillosos como carbonatos, feldespatos, cuarzo, óxidos de hierro y otros.

Como ya se mencionó, encuentran su principal aplicación en la fabricación de agregados y materiales para la construcción, como ladrillería, tubería, tejas y pisos, pero también en pinturas —como abrasivos—, en taponamiento de pozos petroleros y de gas, en cerámica, en la alfarería y en la industria del cemento. Un aspecto importante es el factor transporte, que incide en el costo final de los materiales: a menor distancia, menor costo del producto.

Este tipo de arcilla es la clase más común de material arcilloso, y junto con las *fire-clays* es uno de los materiales cerámicos de más amplia distribución en el mundo, tanto en el ámbito industrial como en lo que respecta a recursos naturales; en general, tienen diversos colores debido a sus grandes proporciones de impurezas. Su contenido de álcalis es alto, pero la presencia de aluminio es más baja que el determinado en las arcillas especiales. Vale la pena anotar que estas arcillas comunes son lo suficientemente plásticas para permitir su moldeo y vitrificación por debajo de los 1100 °C.

En cuanto a sus aplicaciones, a renglón seguido se menciona la composición de algunos productos que utilizan arcillas especiales (tabla 1).

Las "arcillas especiales" están constituidas principalmente por un solo tipo de mineral de arcilla, de cuyas propiedades depende básicamente el comportamiento de este mineral. Estas, a pesar de ser mucho menos importantes en volumen, suponen más del 70 % del valor de las arcillas comerciales y son objeto de comercio internacional (Bradanovic, 2007).

Estas arcillas se pueden clasificar según (IGME, 2014) en:

- Arcillas rojas o comunes
- Arcillas de cocción blanca, caolines, halloisitas y arcillas refractarias
- Bentonitas y tierras de Fuller
- Sepiolitas y paligorskitas A continuación se darán unas breves definiciones y se expondrán sus principales aplicaciones

Tabla 1. Composición típica de los cuerpos cerámicos (% del peso)

Productos	Arcillas plásticas	Arcilla china	Fundente	Cuarzo	Otros
Lozas para paredes	30	20	—	40	10 (caliza)
Cerámica rojas	25	25	15	35	—
Sanitarios de porcelana vítrea	20-30	20-30	15-25	30-40	0.3 (talco)
Porcelana	10	60	15	15	—
Porcelana aislante	30	20	25	25	—
Engobe	50-70	30-50	20-35	15-30	—

Fuente: Roskill (1996)

1.2. Caolín

El caolín es una arcilla blanca muy pura, constituida por silicato de aluminio hidratado, originado por la descomposición de feldespatos y otros silicatos de aluminio. Esta descomposición se debe a los efectos prolongados de la erosión y meteorización. Se compone sustancialmente de caolinita, haloisita y dickita. La caolinita en general no se procesa: se emplea tal como se obtiene de la explotación de una arcosa o arena caolinífera, granito o neis caolinitizado, que es necesario procesar para enriquecerlo con minerales del grupo del caolín (Romero y Barros, 2004). Cuando el caolín se usa para cerámica blanca, se denomina *China-clay*. Su punto de fusión es de 1785 °C.

Los usos de esta arcilla son múltiples. Regularmente se emplea para recubrimientos y rellenos (*coating and fillers*), siempre y cuando cumpla ciertas especificaciones en las diversas industrias. Se utiliza bastante en la industria de la fabricación de pinturas vinílicas (base agua), en la fabricación de piezas de plástico por medio de inyección, en las industrias farmacéutica y cosmética, en la industria del caucho, en la fabricación de cables eléctricos y en la fabricación de papel. Asimismo, tiene otras aplicaciones en la industria de la jabonería, en la fabricación de cemento blanco y en la industria del petróleo.

Se ha establecido que un caolín comercial de alta calidad apenas tendrá partículas mayores de 2 µm, lo que garantiza una riqueza en caolinita superior al 80 %. Esto significa que cuanto mayor sea el contenido en fracciones finas a partir del caolín en bruto, mayor será el porcentaje de caolinita presente (García y Suárez, 2003).

En el argot industrial, las arcillas especiales también se conocen como *arcillas refractarias*. En este grupo se incluyen las arcillas caoliníferas plásticas y dispersables en el agua, conocidas como *ball-clays*, por cuanto permiten hacer formas esféricas con facilidad. Por lo regular son grises o negras, pero al cocerse adquieren un color blanco. Se consideran las más valiosas para la fabricación de cerámica blanca de óptima calidad.

Las arcillas refractarias propiamente dichas suelen contener óxidos de hierro, lo cual impide que se blanqueen, al igual que silicatos de aluminio hidratado, que les da resistencia a altas temperaturas sin que las piezas con ellas realizadas se deformen; por tal razón se les llama *fire-clays*. Por otra parte, las *flint-clays*, o arcillas de pedernal, son arcillas caoliníferas tipo haloisita, duras, carentes de plasticidad, que se utilizan básicamente para la fabricación de elementos refractarios silicoaluminosos. Cuando se rompen, muestran fractura concoide.

Las *tonsteins*, conocidas también como *under-clays*, son arcillas muy similares a las *flint-clays*, que infrayacen a algunos mantos y capas de carbón. Existen además las arcillas denominadas *China-clay*, término usado para referirse al caolín derivado de granitos caolinizados; se caracterizan por ser más plásticas que las *ball-blays*, dan un color blancuzco suave al quemarse y se usan para obtener porcelanas muy finas. Existen otras arcillas cuya particularidad es la inclusión de nódulos de óxidos de hierro, que además contienen caolinita e hidróxidos de aluminio. Se consideran altamente refractarias por la presencia de alúmina; los ceramistas las llaman *burley-clay*.

1.3. Bentonitas

La bentonita es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, independientemente de cualquier connotación genética. Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisicoquímicas. Así, en la clasificación industrial más aceptada se establecen clases de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en el agua. Existen los siguientes tipos, según los criterios de Romero y Barros (2004):

- Bentonitas altamente hinchables o sódicas
- Bentonitas poco hinchables o cálcicas
- Bentonitas moderadamente hinchables o intermedias

La bentonita sódica se usa en el acondicionamiento y revivificación de arena de moldeo en fundiciones, y también como lubricante de lodos de perforación, en proporción de tres libras de bentonita por un pie cúbico de agua. También tiene aplicaciones en cosméticos, en insecticidas, en preparación de medicinas, en la industria del papel y en hormigones especiales.

Igualmente, la bentonita cálcica se utiliza en los lodos de perforación para remplazar a la sódica, cuando la perforación atraviesa secuencias geológicas ricas en aguas saladas, debido a que la sódica, en esta situación, rompe la floculación, lo cual implica la eliminación de la suspensión coloidal necesaria en la perforación (Núñez, 1987).

En ocasiones se somete a las bentonitas a procesos físicos y químicos que tienen por objeto activar o potenciar algunas de sus propiedades para determinadas aplicaciones industriales. Desde el punto de vista industrial, son claves los procesos destinados a modificar las propiedades de superficie del mineral mediante tratamientos de distinta naturaleza, por medio de tratamiento ácido, térmico o de "pilarización", o bien a modificar el "quimismo" del espacio interlaminar (Bradanovic, 2007).

Las bentonitas "pilarizadas" se usan en procesos industriales de purificación de materias primas y en aplicaciones ambientales para descontaminar las aguas. En Colombia, los problemas comienzan a ser críticos en cuanto al mantenimiento de la calidad de las aguas. Según la División de Política Ambiental de Planeación Nacional, se combinan dos fuentes principales de deterioro de las aguas: la erosión de los suelos y la descarga de contaminantes industriales y domésticos. Específicamente, las industrias del café, el petróleo y las flores contribuyen notablemente a la generación de materia orgánica diluida. Se calcula que aproximadamente el 13 % de esa materia orgánica está representado por derivados fenólico, considerados los más nefastos debido a que son altamente tóxicos, resistentes a la degradación química y poco biodegradables. En este caso, experimentos con bentonita sódica del Valle del Cauca, tipo montmorillonita, han permitido deducir que se perfila como un sólido con grandes bondades para procesos de pilarización y su posterior aplicación en el tratamiento de materia orgánica diluida (Daza *et al.*, 2004).

Existen igualmente procesos fisicoquímicos que permiten efectuar una activación sódica sobre bentonitas cálcicas, tratándolas con carbonato sódico, para obtener bentonitas sódicas. Como dato complementario, se anota que Estados Unidos, la Unión Europea y Japón son los principales productores de bentonitas activadas. En el contexto histórico, se tiene que en 1970 se inició la fabricación de montmorillonita sintética en Houston (Texas), con base en un interestratificado al azar illita/montmorillonita. El material se usa para catálisis en *cracking*, hidrogenación/deshidrogenación y como componente en catalizadores hidrotratantes (Bradanovic, 2007).

En Inglaterra también se fabrica hectorita sintética, comercializada con el nombre de *laponita*, que resulta más pura que el material natural y se destina a los mismos usos que la bentonita sintética (Romero y Barros, 2004).

El término *fuller's farth* (arcilla blanqueadora), correspondiente en español a *tierra de batán*, es empleado por los ingleses para denominar a las arcillas que están constituidas fundamentalmente por montmorillonita, con calcio como catión de cambio; los estadounidenses lo aplican a la arcilla paligorskita. A las bentonitas cálcicas, que los ingleses denominan *fuller's earth*, los estadounidenses las llaman *bentonitas no hinchables* (Bradanovic, 2007).

Otra importante aplicación de estas arcillas especiales es la de la remoción de metales pesados en aguas residuales. Esto se determinó tras efectuar algunos ensayos, como el de hacer circular estas aguas residuales en lechos individuales de arcillas tipo sepiolita (montmorillonita, 76 %), bentonita magnésica (vermiculita, 74.4 %), bentonita alumínica (esmectita, 69.1 % y paligorskita, 80 %), por un tiempo de contacto de tres horas. Previamente se analizaron los contenidos de metales pesados y se compararon con los análisis después de pasar por cada lecho. Se determinó que la sepiolita y la bentonita magnésica son eficaces para reducir la concentración de metales pesados en aguas residuales industriales. Además, se concluyó que la adsorción depende del pH, del contenido de metales y del contenido de sólidos en suspensión (Andrade, Covelo y Vega, 2005).

1.4. Paligorskita-sepiolita

Las arcillas denominadas *sepiolitas* y *paligorskitas* están constituidas en general por dichos minerales en un porcentaje superior al 50 %. Son minerales con hábito fibroso y una gran área superficial, a causa tanto del pequeño tamaño de partícula como de la porosidad estructural que presenta su estructura. La superficie específica teórica se calcula alrededor de los 900 m^2/g, aunque la superficie accesible es muy inferior (García y Suárez, 2003). La sepiolita y la paligorskita proceden de la descomposición de

rocas carbonatadas y se encuentran en medios continentales, cuencas lacustres o procesos edáficos.

Su estructura particular les confiere una serie de propiedades, como formar suspensiones poco afectadas por la concentración iónica y una enorme capacidad sorcitiva (absorción/adsorción), por lo que son poderosos decolorantes y absorbentes. También tienen propiedades que las dotan de capacidad para formar geles y suspensiones estables de alta viscosidad a bajas concentraciones de sólido. Al igual que las esmectitas, son susceptibles de activarse mediante tratamientos térmicos y ácidos (García y Suárez, 2003).

La haloisita y la hectorita pueden considerarse igualmente arcillas especiales. La haloisita es un mineral del grupo del caolín, y la hectorita pertenece al grupo de las esmectitas. En general, las arcillas haloisíticas son caolines, y las hectoritas, un tipo de bentonitas. Ambos tipos de arcillas son relativamente escasos en el mundo (García y Suárez, 2003).

Recientemente algunos autores han optado por restringir el término *arcilla especial* a las arcillas raras, como la sepiolita o hectorita, poco abundantes, así como a la paligorskita y las bentonitas blancas. También lo usan para arcillas modificadas químicamente, como las bentonitas activadas con tratamientos ácidos, u organofílicas, y dejan por fuera de tal denominación a los caolines, bentonitas y, por supuesto, las arcillas comunes (García y Suárez, 2003). Mientras esta restricción se oficializa, se continuará utilizando los conceptos tradicionales.

2. Ambiente geológico

2.1. Características

La arcilla es un aluminosilicato hidratado; esto quiere decir que químicamente está constituida por silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) e hidrógeno (H). Mediante las propiedades de los rayos X, y posteriormente con el microscopio electrónico, fue posible determinar que los silicatos están formados por cristales regulares con una unidad básica: el tetraedro. De esta manera se ha tratado de entender la estructura a la cual están ligadas las arcillas. A continuación se observa un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno (O) en los vértices (figura 1).

La unión de varios tetraedros genera hojas que se extienden a lo largo y a lo ancho, y que dan origen a las estructuras laminares formando hojas tetraédricas (tipo T), a la vez, existen otros cuerpos poligonales que se pueden unir entre sí para formar cadenas, tal como sucede con el octaedro (tipo O), formando los compuestos de aluminio, por ejemplo Al $(OH)_6$, o del magnesio.

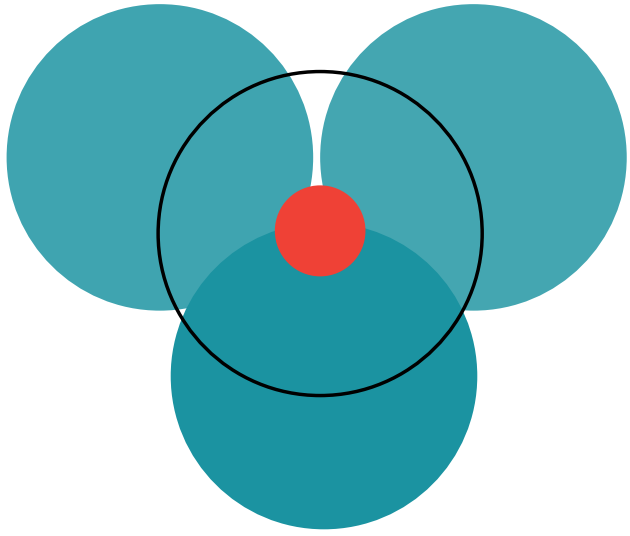

Figura 1. El tetraedro elemental, o la pirámide triangular, muestra un átomo central de silíceo

Fuente: modificado de Madrid (2012)

2.1.1. Composición mineralógica

La definición de la composición mineralógica permite obtener la identificación de los minerales arcillosos simples e interestratificados, como las caolinitas, micas, esmectitas, cloritas y de los demás minerales presentes en diferentes proporciones, entre los cuales sobresalen cuarzos, feldespatos, minerales de hierro, piritas, yesos y carbonatos.

Como se anotó, la distribución estructural puede originar láminas tipo 1:1 o T-O, y láminas 2:1 o T-O-T, que se llaman comúnmente *filosilicatos bilaminares* y *trilaminares*, respectivamente.

2.1.1.1. Filosilicatos bilaminares (T-O)

Generalmente los tetraedros son de silicio rodeados de oxígeno, aun cuando en ocasiones el silicio puede sustituirse por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ion predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidroxilos (OH). Cuando el ion dominante es el aluminio, la lámina que se forma se denomina dioctaédrica, y cuando es el magnesio, se dice que la capa es trioctaédrica. Los iones están apilados de tal forma que se mantiene la electronegatividad entre ellos. La separación entre láminas es del orden de siete unidades Ángstrom (Å). En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales: la kandita (dioctaédrica) y la serpentina

(trioctaédrica). A continuación se ilustra la distribución del caolín, perteneciente a la familia de la kandita (figura 2) (Bernal *et al.*, 2003).

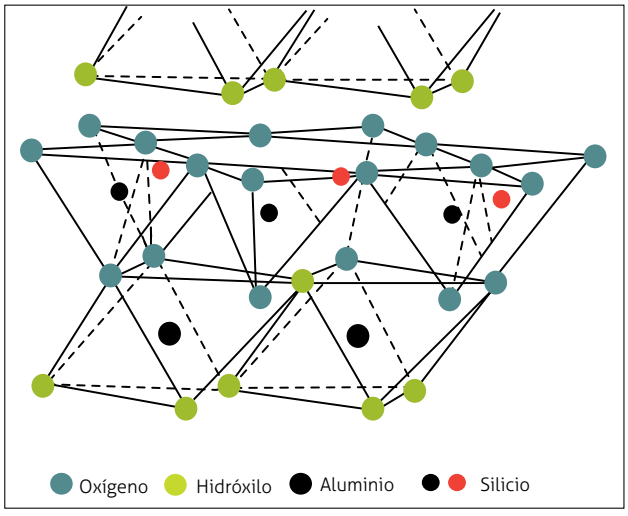

Figura 2. Lámina T-O (estructura de la caolinita).

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

De acuerdo con Besoain (1985) (en Espitia *et al.*, 2003), la familia de la kandita, que incluye minerales dioctaédricos como la caolinita, haloisita, nacrita y dickita, está compuesta de los minerales arcillosos más extendidos y frecuentes en el mundo. El nombre *caolín* proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región situada en el norte de China, sitio donde se ha explotado esta arcilla desde el siglo VIII para usarla en la fabricación de porcelanas. El caolín es una arcilla formada por caolinitas, que se produce generalmente por la descomposición de feldespatos. La composición química de la caolinita puede expresarse como Al_2O_3. $2SiO_2$. $2H_2O$.

Una arcilla que presente abundancia de caolinita superior al 20 % tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir, requiere temperaturas mucho más altas (lo que se conoce como *refractariedad*), ofrece baja plasticidad, se seca fácilmente y no tiene buena resistencia mecánica (Espitia *et al.*, 2003).

Por otra parte, la familia de la serpentina incluye los minerales trioctaédricos denominados crisotilo, lizardita, antigorita y bertierina. La composición química de una serpentina puede expresarse como $3MgO.2SiO_2.2H_2O$ (Bernal *et al.*, 2003).

En general, las arcillas expansibles, presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad (Espitia et al., 2003).

2.1.1.2. Filosilicatos trilaminares (T-O-T)

En cuanto a los filosilicatos trilaminares, se ha establecido que las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. La separación entre láminas es del orden de 10Å. Comprenden tres familias: esmectitas, micas y minerales fibrosos o atapulgitas (Bernal *et al.*, 2003).

La familia de las esmectitas o minerales expandibles incluye especies dioctaédricas como la montmorillonita, la nontronita y la beidelita, y trioctaédricas como la saponita, la sauconita y la hectorita. También se les da el nombre de bentonitas. Su composición química varía por la capacidad de sustitución elemental y de absorción de agua. Una fórmula general para una esmectita es $Al_{2-X}Mg_XSi_4O_{10}(OH)_2$ (Bernal *et al.*, 2003).

La montmorillonita deriva su nombre del francés Montmorillon, lugar de Francia donde se descubrió esta clase de arcilla en el año 1874. En general, las arcillas expansibles presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad. Seguidamente se muestra la estructura elemental de la montmorillonita (figura 3).

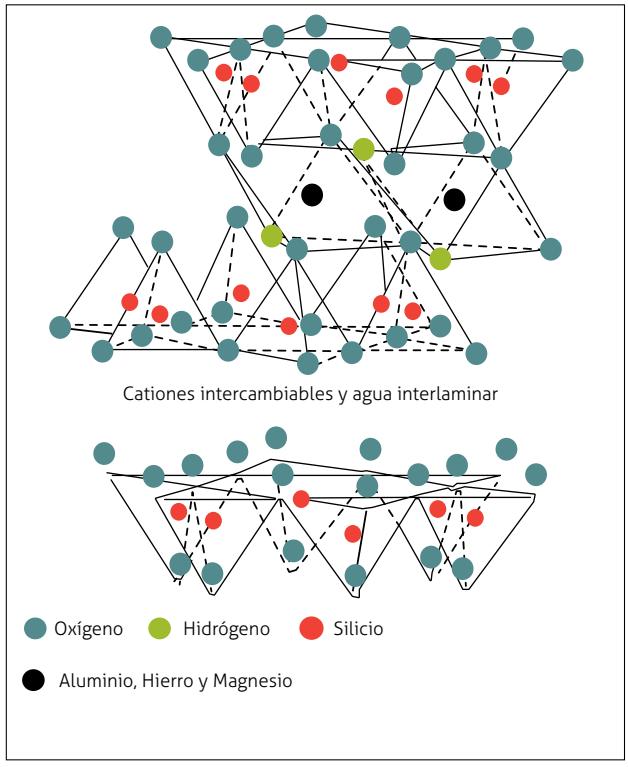

Figura 3. Lámina T-O-T (estructura elemental de la montmorillonita).

Fuente: modificado a partir de Bernal *et al.* (2003)

En cuanto a la familia de las micas, se ha establecido que son los minerales clasificados como arcillas que tienen la misma estructura de las esmectitas, con la salvedad de 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 que tampoco los cationes interlaminares sean intercambiables (Meléndez y Fuster, 2003). A esta familia pertenecen las vermiculitas, el talco, la pirofillita, la illita y la moscovita. Los minerales de arcilla se observan en la tabla 2.

En la celda cristalográfica de las micas, algunos silicios pueden remplazarse por aluminio, y la diferencia de carga es balanceada por iones potasio. La composición química de la illita puede expresarse como K Al_2O_3.4SiO_2.H_20 (Espitia *et al.*, 2003).

Tabla 2. Minerales de arcilla

Minerales dioctaédricos		Minerales trioctaédricos	
Tipo 1:1			
Kaolinita		Serpentinita	
Tipo 2:1			
Pyrofilita Esmectita Vermiculita Ilita, Glauconita		Talco Esmectita Vermiculita	
Micas	Al. Muscovita Paragonita	Micas	Mg-Fe: Flogopita, Biotita, Lepidolita
	Fe: Celadonita		

Fuente: Meunier (2005)

A la familia de las atapulgitas, o minerales fibrosos, pertenecen la sepiolita y la paligorskita, formadas por láminas discontinuas tipo mica. A diferencia de las ya nombradas, que se presentan en láminas, estas se presentan como fibras. En su estructura se encuentra una capa basal continua de tetraedros y capas periódicamente discontinuas de octaedros. Su aplicación en el proceso cerámico es aún desconocida (Bernal *et al.*, 2003).

Por último, la familia de las cloritas es un grupo de minerales cuyas láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas, por lo que se las denomina 2:1:1 o T-0-T-0. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga, pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidróxidos y por cationes interlaminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden de 14Å (un ángstrom equivale en microscopia a la diezmillonésima parte de un milímetro) (Espitia *et al.*, 2003).

La fórmula general de las cloritas es R5 ++ R+++ Si3 R+++ O10 (OH)8, en la cual R++ puede ser Fe o Mg y R+++ puede ser Al o Fe.

En la tabla 2 se muestra la clasificación de los minerales arcillosos más comunes, según la clasificación de García y Suárez (2002), que se encuentra en Bernal *et al.* (2003). En la literatura existen otras clasificaciones, como por ejemplo la de Bateman (1961) y el esquema de clasificación de los filosilicatos de la Aipea, luego de las conferencias de Madrid (1972) y México (1976) (Tabla 3).

Hay otros minerales contenidos en las arcillas, como feldespatos, sílice, carbonato de calcio, mineral de hierro, ilmenita, yeso, mineral en estado coloidal como el alófono y los óxidos hidratados.

Tabla 3. Clasificación de los minerales arcillosos más comunes

Láminas	Dioctaédricos	Minerales	Trioctaédricos	Minerales
Bilaminares T-O; 1:1	Kanditas	Caolinita, nacrita, dickita, haloisita	Serpentinas	Antigorita, crisotilo, lizardita, bertierina
	Micas	Illita, moscovita, paragonita, pirofilita	Micas	Flogopita, biotita, lepidolita, talco,
Trilaminares T-O-T; 2:1	Esmectitas (expansibles)	Montmorillonita, beidelita, nontronita, vermiculita	Esmectitas	Saponita, hectorita, sauconita
	Atapulgitas (fibroso)	Paligorskita	Atapulgitas	Sepiolita
T-O-T-O; 2:1:1	Cloritas	Sudoitas	Cloritas	Clinocloros, proclorita

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Actualmente, la composición mineralógica se determina utilizando técnicas de difracción de rayos X, complementadas con análisis químicos, térmicos, petrográfico y de microscopia electrónica.

La difracción de rayos X es una técnica instrumental que permite identificar fases cristalinas o planos cristalográficos en muestras sólidas de compuestos químicos o minerales. La técnica está basada en la ley de Bragg, que establece una relación directa entre el ángulo de incidencia de los rayos X y la distancia entre dos planos del cristal. Es una técnica especialmente útil para identificar minerales de arcilla, ya que estos se caracterizan por su pequeño tamaño, difícil de observar en un microscopio convencional. Los registros consecutivos de difractogramas, seguidos de postratamientos, permiten diferenciar las especies y grupos de minerales de arcilla, que pueden identificarse con mayor seguridad al combinar los datos suministrados por este método y los que se obtienen con los análisis químicos.

Otras determinaciones se realizan mediante el análisis termogravimétrico (TGA), que indica cómo se comportarán algunos compuestos a cierta temperatura, datos que resultan básicos para las etapas de cocción y horneado de piezas. Otra técnica utilizada es el análisis termodiferencial (DTA, por su sigla en inglés).

Por otra parte, el análisis químico de los minerales permite conocer cuáles son los elementos presentes y en qué proporción se encuentran en la mezcla mineral natural; sin embargo, esta técnica no indica la forma como están combinados en la muestra ni su estado de oxidación. Tradicionalmente, con el análisis químico se determinan los siguientes elementos: silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio.

Para el análisis por vía húmeda de estos minerales se han aplicado históricamente diversos procedimientos clásicos, como gravimetría, volumetría, complexometría y algunas técnicas instrumentales, como colorimetría. Actualmente, con el uso de absorción atómica y fluorescencia de rayos X se pueden lograr análisis mucho más completos. Los resultados del análisis elemental se expresan en los respectivos óxidos, como está mundialmente aceptado (Espitia *et al.*, 2003).

En ocasiones se hacen otros análisis químicos, en especial cuando se desea conocer la presencia de algunos aniones, sobre todo los sulfatos y los sulfuros, que pueden reaccionar en el proceso industrial y son formadores potenciales de eflorescencia en los productos. Se puede expresar que los resultados de los análisis químicos combinados con los resultados de los análisis mineralógicos suministran un valioso conocimiento para la formulación de pastas y el control del proceso.

En la actualidad se han desarrollado nuevas técnicas, en particular para aplicar en análisis muy especializados o específicos, entre las que cabe mencionar las técnicas o metodologías basadas en análisis por espectroscopia infrarroja, con el cual se determinan los grupos funcionales que existen en el sólido, la espectroscopia Raman, que se basa en el análisis de estructuras moleculares.

2.1.2. Origen de las arcillas

Los autores (Domínguez y Schifter, 1995) consideran que los silicatos son el árbol genealógico de las arcillas, y agregan que la familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo. De esto se desprende que las arcillas son una rama de los silicatos, y su formación obedece a tres mecanismos fundamentales: por herencia, por neoformación y por transformación.

El primer mecanismo señala que las arcillas se originaron a partir de una roca madre, y este tipo de arcillas predominan en los mares y lagos. Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química con varios componentes (o a partir de la arcilla original), para la cual se requirieron mayor energía y ciertas condiciones hidrotérmicas. El primer mecanismo fue más afín con las regiones árticas, mientras que los otros dos, a pesar de que se pueden desarrollar en diferentes climas, fueron más dominantes en los trópicos húmedos. La caolinita de los suelos se origina típicamente mediante el mecanismo de neoformación, y de manera más inusual mediante trasformaciones de otros minerales. Como se deduce de las fórmulas y de su composición, sus condiciones de formación implican un medio que estimule el lavado de cationes alcalinos, alcalinotérreos y hierro, debido, fundamentalmente, a dos razones: los iones bivalentes precipitan la sílice, y si la relación SiO_2. Al_2O_3 fuese mayor que 2 (relación de la caolinita), se formaría un mineral diferente. Si existiesen Ca y Mg en el sistema, su presencia podría interferir en la formación de caolinita, debido a que la estructura de esta no tiene esos cationes (Artigas, 2004).

Algunas propiedades físico-químicas de las arcillas indican que cuando se han originado relativamente hace poco tiempo, pueden perder de modo parcial el agua retenida en la superficie de las partículas, a causa de un secamiento natural; no obstante, esa agua se puede recuperar cuando se ponga de nuevo en contacto con un medio húmedo. Por el contrario, las arcillas que se formaron hace varios millones de años generalmente pierden esta capaci-

dad de recuperar su estado original, en razón de que, con el tiempo, los minerales arcillosos que son sensibles a las variaciones del medio se transforman en otros minerales estructuralmente similares, pero que no pueden producir soluciones coloidales.

Esta sensibilidad de los minerales arcillosos a las condiciones del medio se refleja en las arcillas, dado que la temperatura, acidez y composición de las aguas pueden ocasionar transformaciones de los minerales que venían en suspensión. Se ha visto que las arcillas depositadas en ambientes continentales son más caoliníticas, mientras que en las depositadas en ambientes marinos y lacustres predominan las illitas y las montmorillonitas (Meléndez y Fuster, 2003).

El edáfico es el principal medio formador de arcillas, y puede serlo por alteración o por remplazo de silicatos, por transformación de otros minerales arcillosos y por neoformación a partir de soluciones edáficas. Para que se dé este proceso existen factores condicionantes, como la naturaleza de la roca madre, el clima, el grado de lixiviados y el quimismo de las soluciones. Así por ejemplo, las illitas y cloritas presentan un bajo lixiviado y un clima templado, mientras que las montmorillonitas sufren lixiviados medios en suelos templados, con un pH neutro, o en suelos áridos mal conservados. Por otra parte, la caolinita y la haloisita provienen de suelos ácidos tropicales, mientras que la sepiolita y la paligorskita resultan a partir de lagos alcalinos ricos en magnesio.

Los factores que controlan la descomposición de las rocas y la formación de arcillas son tiempo, bioclimáticos (temperatura y precipitación) y locales, como tipos de roca parental, topografía y drenaje. Por ejemplo, esto condiciona la presencia de caolinita a zonas de latitud alta, con drenajes fluviales en regiones tropicales, y de la illita (clorita) a zonas de latitud alta y drenaje fluvial en zonas templadas. Por otra parte, la actividad volcánica relacionada con zonas de dorsal y arco de islas es fuente de esmectitas

Por tamaño de grano existe una especie de gradación, así: la caolinita, con un tamaño de 5 μm, se ubica en sitios próximos a la costa, y la illita-montmorillonita, con tamaños que van de 0.1 a 0.3 μm en zonas distales. La cristalinidad de la illita aumenta cuando se incrementa la temperatura.

Se ha establecido que las illitas están presentes en forma abundante en rocas del Precámbrico-Paleozoico, mientras que en rocas más modernas aumenta progresivamente la presencia de esmectitas. Seguidamente se puede apreciar la evolución del proceso.

Las arcillas pueden ser de dos clases: estáticas (residuales) y sedimentarias. Las primeras se forman por la descomposición de rocas en el mismo lugar de su formación, debido al intemperismo superficial y a la alteración hidrotermal de silicatos hidratados ricos en aluminio; suelen ser más puras, pero menos plásticas. Las arcillas más importantes, entre las residuales, son los caolines y las caoliníticas, y pese a que se encuentran casi siempre asociadas con minerales primarios de su misma fuente, estos son fácilmente removibles por lavado. Cabe anotar que el contenido de fracción arcillosa en estos depósitos es muy variable y es probable que debajo del depósito residual se encuentre inalterada la roca fuente.

Las sedimentarias, también llamadas *transportadas*, se forman mediante procesos sedimentarios, así como por la acción del viento, del agua o de fenómenos periglaciares, esto es, que son redepositadas en un medio sedimentario distinto del de su fuente original, y suelen ser más finas y plásticas. Las arcillas transportadas y depositadas forman estratos lenticulares o tabulares. Contienen impurezas que por lo general son cuarzos y limolitas.

A los medios marinos pueden llegar fracciones muy finas de minerales arcillosos y depositarse en zonas muy amplias, donde es factible que se formen acumulaciones de caolines y arcillas refractarias. En algunos de estos medios también se originan materiales calcáreos y otros que eventualmente pueden contaminarlas, por lo que no tienen aplicación en la industria refractaria y de porcelana; en contraposición, pueden hallar una buena utilización en la industria de ladrillos. Entre las sedimentarias también se incluyen las denominadas *arcillas coluviales*. Posteriormente se ilustrarán de manera general los medios o ambientes sedimentarios favorables para la sedimentación de los materiales arcillosos (tabla 4).

Tabla 4. Medios sedimentarios favorables para formar sedimentos arcillosos

Medio sedimentario		Energía	Litología
Continental	Abanico aluvial	Ríos y corrientes de gravedad	Arena, grava, fangos arcillosos
	Desértico	Viento y corrientes de agua efímeras	Arena, limos de variada composición
	Glacial	Hielo	Bloques, arenas, gravas, arcillas
	Fluvial (meandros)	Energía cinética, corriente de agua	Arena, limo arcilloso y lentejones de gravas
	Fluvial (anastomosado)	Energía cinética, corriente de agua	Arena, grava y limo arcilloso
Costero	Delta	Ríos, mareas y oleaje	Detritos de todos los tamaños, con predominio de limos y arcillas
	Planicies de inundación	Corrientes	Arena, arcilla
Marino	Plataforma continental	Oleaje, mareas	Arena, material arcilloso
	Margen continental	Corrientes marinas	Arcilla, arena
	Fondo marino	Corrientes marinas	Arcilla

Fuente: Corrales *et al.* (1977)

Dependiendo del sitio donde se depositan estos materiales, se pueden encontrar diversos tipos de arcillas. Se consideran los siguientes:

2.1.2.1. Arcillas fluviales

Son aquellas que están asociadas a las llanuras de inundación por corrientes en movimiento, con una geometría controlada por la red de drenaje, limitadas por el valle en curso. Los depósitos tienen forma de lentejones, con cambios laterales a limos arenosos y arenas. Muestran estratificación cruzada, laminación cruzada y laminar; las grietas de desecación son frecuentes.

2.1.2.2. Arcillas paludales (de pantano)

Son características las litologías de tamaño limo a arcillas, con predominio de restos orgánicos vegetales, y estructuras sedimentarias con maceración de vegetales y estructuras de raíces. Su geometría muestra lentejones de poco espesor. Estas arcillas son muy plásticas y relativamente limpias, y se consideran equivalentes a las *under-clay.*

2.1.2.3. Arcillas aluviales

Generalmente corresponden a fangos arcillosos asociados a cantos, conglomerados y arenas mal clasificados, y donde se originan depósitos en forma de cuñas, canales radiales y lentejones. A menudo existen señales de oxidación.

2.1.2.4. Arcillas coluviales

Son las formadas por lavados de depósitos preexistentes de arcillas residuales, que se han acumulado en zonas de pendientes, adyacentes al nuevo sitio de acumulación.

2.1.2.5. Arcillas marinas

Son aquellas que viajan en suspensión mar adentro, en un medio de aguas relativamente tranquilas. Se considera que originan depósitos uniformes, extensos y de gran espesor. Presentan variaciones laterales en su composición, por cambios de las corrientes que transportan dichos materiales. Entre ellos se presentan diversos minerales arcillosos, que les imprimen el típico tono rojo oscuro, pardo o chocolate, de donde deriva su nombre de arcillas rojas. Esta facies ocupa un 28 % del océano y se distribuye por los fondos de más de 4000 m de profundidad. Algunos de estos depósitos marinos corresponden a unidades geológicas donde las arcillas se encuentran estratificadas como arcillolitas, y alternan con niveles de calizas y arenitas cuarzosas.

2.1.3. Nombres más comunes utilizados para mencionar a las arcillas

En el contexto de las arcillas, desde el punto de vista de su utilización, con frecuencia se les asignan nombres para diferenciarlas y caracterizarlas en la industria, entre los cuales se destacan los siguientes:

2.1.3.1. *Fire-clay* (arcilla refractaria)

Arcilla silícea con alto contenido de silicatos alumínicos hidratados, compuesta de caolinita, con pequeñas cantidades de impurezas como illita, cuarzo, hierro, calcio y álcalis. Rica en óxidos metálicos, soporta temperaturas de 1500 °C o más. Se emplea en revestimientos de hornos, vasijas para productos químicos, crisoles, retortas, equipos para fundición, ladrillos refractarios y otros (Núñez, 1987).

2.1.3.2. *Ball-clay* (arcilla plástica)

Con este nombre se designan las arcillas caoliníticas altamente plásticas y fácilmente dispersables en agua. Su mayor característica es el color blanco que adquiere después del proceso de quemado, aunque su color primario sea oscuro. Su principal utilidad consiste en la elevada plasticidad y la resistencia mecánica que les imprime a las pastas preparadas con este tipo de arcillas (Núñez, 1987).

2.1.3.3. *Flint-clay* (arcilla de pedernal)

Arcilla refractaria muy dura y lisa, de aspecto de pedernal. Se rompe con fractura concoidea y su principal constituyente es la haloisita (Núñez, 1987).

2.1.3.4. *Burley-clay*

Su origen no está claramente determinado, pero se utiliza este término para denominar a aquellas arcillas que incluyen oolitos o nódulos ricos en alúmina u óxidos de hierro. Normalmente contiene diáspora (hidróxido de aluminio) y caolinita. Es una arcilla altamente refractaria debido a su contenido de alúmina (Núñez, 1987).

2.1.3.5. *Under-clay*

Término de poco uso en Colombia. Generalmente es una arcilla similar a la refractaria y se desarrolla debajo de los mantos de carbón; esto no significa que las *under-clay* sean refractarias ni que todas las arcillas refractarias se produzcan debajo de los mantos de carbón (Gary *et al.*, 1973, en Núñez, 1987).

2.1.3.6. *China-clay*

Este nombre da a entender que en China existen los mejores y más apetecidos yacimientos de este tipo de arcillas; y se debe tomar como el término comercial para el caolín obtenido de las rocas graníticas caolinizadas y utilizado en la manufactura para producir artículos de porcelana fina. Esta arcilla es más plástica que la *ball-clay* y al quemarse adquiere un tono blanco muy suave.

2.1.3.7. Arcilla figulina

Se caracteriza por contener impurezas como arena, caliza y óxidos de hierro.

2.1.3.8. Arcilla roja

Se origina en medios marinos constituidos por restos de materiales calcáreos y terrígenos, polvo volcánico, restos de esponjas silíceas, dientes de tiburón, etcétera. Su color rojo es producto de sus constituyentes férricos. Estos depósitos son tan extensos, que cubren casi el 60 % de la superficie marina.

2.1.3.9. Arcilla grasa y arcilla magra

Se le llama *arcilla grasa* a la que es muy plástica. Hay algunas arcillas que contienen cierto grado de impurezas, lo cual hace disminuir sus propiedades plásticas, por lo que se denominan, entonces, *arcillas magras*.

2.1.3.10. Arcilla ferruginosa

Generalmente se compone de diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro. Pueden ser de color amarillento, ocre, e incluso de aspecto negro, en cuyo caso se denominan *tierras de Siena*, debido a la presencia de óxido de hierro hidratado, mientras que las denominadas *arcillas rojas* incluyen por lo general óxidos de hierro, pero de tipo hematita. Esta particularidad 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.

2.1.3.11. Arcilla de batán

Llamada también *tierra de batán*, debido al uso que tuvo en el batanado (golpeado) de las telas y de fibras vegetales como el algodón. Este proceso consistía en limpiar las fibras formadas en la máquina batán, y para eliminar la materia grasa se le la adicionaba arcilla, por lo general del tipo esmectita (del griego *smektikós*: "que limpia") (Domínguez y Schifter, 1995).

2.1.3.12. Arcilla marga

Material impermeable y frágil, con un contenido de caliza está entre 20 y 60 %, aproximadamente.

2.1.3.13. Arcilla atapulgita

Llamada también *tierra de Florida* o *floridrín*, y en ocasiones tierra de Fuller. Este último término también se empleó para denominar a las sepiolitas. En la actualidad, la atapulgita es llamada paligorskita (Domínguez y Schifter, 1995).

2.1.3.14. Arcilla bentonita

Nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, que, tratadas con compuestos químicos aminados, como el dodecilamonio, se vuelven repelentes al agua (hidrofóbicas), aunque mantienen gran afinidad por las especies orgánicas, en particular los aceites, las grasas y los colorantes. El nombre *bentonita* proviene de Fort Benton (Wyoming), donde W. C. Knight descubrió un enorme yacimiento de esta clase de arcilla en 1896 (Domínguez y Schifter, 1995).

2.1.3.15. Arcilla dura

Es una arcilla refractaria compuesta esencialmente de caolinita, pero es plástica.

2.1.3.16. Arcilla diáspora

Arcilla compuesta de diáspora y caolinita. La diáspora es un óxido de aluminio hidratado con 85 % de Al_2O_3 y 15 % de agua. Es muy dura y muy refractaria. Se emplea casi exclusivamente en la industria refractaria.

2.1.3.17. Arcilla esferoidal

Compuesta principalmente de caolinita, pero de color más oscuro que el caolín. Se emplea en la manufactura de cerámica en la que no prevalece el color blanco.

2.1.3.18. Caolín

Es la arcilla más apetecible desde el punto de vista industrial, y su origen puede ser estático o residual, sedimentario y coluvial.

Ahora es interesante mencionar la gran variedad de rocas que tienden a caolinizarse y originar acumulaciones de interés económico. Entre estos tipos de rocas potencialmente generadores de caolines cabe mencionar rocas ígneas de composición granítica, granodirítica, tonalítica, diorítica, pegmatítica y aplítica, rocas metamórficas, especialmente neises y algunas pizarras sericíticas, rocas volcánicas de composición ácida y rocas sedimentarias, sobre todo arenitas arcósicas y grauváquicas.

Rodríguez (1998) señala que los mecanismos de caolinización son complejos y que, de acuerdo con las investigaciones más recientes, consisten en un proceso de hidrólisis simultáneo con la meteorización de la roca, en el que los elementos liberados durante el proceso sufren transformaciones o neoformaciones que se pueden considerar secuenciales. Según Grim (1962, en Rodríguez, 1987), se podría explicar con la siguiente secuencia:

Feldespato potásico → alofana → haloisita → caolinita.

Por otra parte, cabe anotar que en China los caolines se derivan de cuatro clases de depósitos: hidrotermal, intemperismo, sedimentario y uno denominado "caolín de la serie del carbón". De este último se calculan reservas del orden de los 170 millones de toneladas, que están intercrecidas con los carbones, y geográficamente se localizan en el norte de China.

2.1.3.19. Bentonitas

Esta roca, compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, es propia de zonas de estuarios y zonas de alteración de tobas volcánicas en ambientes marinos o continentales someros. Una de sus características es su plasticidad. Sus colores varían entre blancuzco, verde pálido y azul pálido cuando está fresca, y cambia a colores crema, amarillento, rojizo a castaño cuando se la expone a los agentes atmosféricos.

La bentonita se origina en ambientes volcánicos a partir de la acumulación de cenizas volcánicas, como tobas y demás depósitos vulcano-sedimentarios. Se forma por desvitrificación de vidrio volcánico mediante alteración hidrotermal durante el proceso de diagénesis. La montmorillonita es el principal mineral constituyente de la bentonita. Estos minerales suelen ser sensibles a cambios de humedad y temperatura, por lo que la bentonita se conserva mejor en climas relativamente secos.

2.1.4. Propiedades de las arcillas

Las importantes aplicaciones industriales de las arcillas radican en sus propiedades físico-químicas, que a su vez derivan, sobre todo, de su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 4 μm), su morfología laminar (filosilicatos) y las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar (García y Suárez, 2003).

Las arcillas tienen un valor elevado del área superficial, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad y a la vez, presentan amplia superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido-líquido y son capaces en algunos casos de hincharse, con el desarrollo de propiedades geológicas en suspensiones acuosas (García y Suárez, 2003).

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que se pueden intercambiar con facilidad mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes. A esta propiedad se la conoce como *capacidad de intercambio catiónico*, y es también la base de multitud de aplicaciones industriales (García y Suárez, 2003).

2.1.4.1. Superficie específica

La superficie específica, o área superficial de una arcilla, se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes por unidad de masa, y se expresa en m^2/g (García y Suárez, 2003).

Las arcillas tienen una elevada superficie específica, fundamental para ciertos usos industriales, en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad. En la **Tabla 5** se muestran algunos valores de superficies específicas de las arcillas.

Tabla 5. Superficies específicas de algunas arcillas

Tipo de arcilla	Superficie específica
Caolinita de elevada cristalinidad	Hasta 15 m^2/g
Caolinita de baja cristalinidad	Hasta 50 m^2/g
Haloisita	Hasta 60 m^2/g
Montmorillonita	80-300 m^2/g
Sepiolita	120-240 m^2/g
Paligorskita	100-200 m^2/g
Illita	Hasta 50 m^2/g

Fuente: Romero y Barros (2004)

2.1.4.2. Capacidad de intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas, que pueden cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH, equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden generarse de tres formas: sustituciones isomórficas dentro de la estructura, enlaces insaturados en los bordes y superficies externas, y disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer caso, conocido como *carga permanente*, representa un 80 % de la carga neta de la partícula, si se tiene en cuenta que es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina (García y Suárez, 2003).

Seguidamente se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g (meq significa miliequivalentes) (tabla 6).

Tabla 6. Intercambio catiónico (meq/100 g)

Tipo de arcilla	Intercambio catiónico
Caolinita	3-5
Haloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200
Sepiolita-paligorskita	20-35

Fuente: Romero y Barros (2004)

2.1.4.3. Capacidad de absorción

Las arcillas con características absorbentes tienen aplicaciones especiales, precisamente por tener esta capacidad de absorber agua en los espacios interlaminares de las esmectitas o en los canales estructurales de las sepiolitas y paligorskitas.

La capacidad de absorción de este tipo de arcillas está directamente relacionada con las características texturales, es decir, superficie específica y porosidad, y se puede hablar de dos clases de procesos que difícilmente se producen de forma aislada: absorción, cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad, y adsorción, cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado *adsorbato* (García y Suárez, 2003).

Por su parte, la capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y para una misma arcilla depende de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100 % con respecto al peso (García y Suárez, 2003).

2.1.4.4. Hidratación e hinchamiento

La hidratación y la deshidratación del espacio interlaminar son características propias de las esmectitas, cuya importancia es crucial en los usos industriales. Aunque la hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas, que da lugar al hinchamiento. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento; si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida (García y Suárez, 2003).

2.1.4.5. Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua envuelve las partículas laminares, lo cual produce un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras, cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento (García y Suárez, 2003).

Generalmente, esta plasticidad puede cuantificarse mediante la determinación de los límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico y límite de retracción. Estos marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo: sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez *et al.*, 1975).

Además, Romero y Barros (2004) anotan que la relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece invaluable información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Por otra parte, en función del catión de cambio, hay una notable variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso en un mismo mineral arcilloso. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal: en general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta es su estructura, más plástico es el material (García y Suárez, 2003).

2.1.4.6. Tixotropía

La tixotropía se define como la pérdida de resistencia de un coloide cuando se amasa, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas se convierten en un verdadero líquido cuando de amasan. Si a continuación se las deja en reposo, recuperan su cohesión, al igual que el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento, deberá tener un contenido en agua próximo a su límite líquido; por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico (García y Suárez, 2003).

2.2. Tipo de depósito

Dependiendo del sitio donde se acumulan estos materiales, en general se pueden encontrar las siguientes formas de depósitos: recientes, como aluviones y coluviones, estratificados, residuales o de meteorización, y en rocas con bajo grado de metamorfismo.

2.2.1. Aluviales

Los aluviones recientes, localizados en las cercanías de los materiales formadores de arcillas, tienen un perfil de meteorización material limo-arcilloso con calidades que los hacen aptos para usarlos como arcillas estructurales.

2.2.2. Coluviales

Las arcillas coluviales tienen naturaleza análoga a la de las arcillas residuales, y se diferencian de estas en que han sufrido desplazamientos cortos por deslizamientos o lluvias. Las arcillas coluviales están relacionadas, por tanto, con las rocas existentes en las proximidades de la roca generadora.

2.2.3. Depósitos en rocas estratificadas

En este tipo de depósitos, durante el proceso de transporte —bien sea en agua o en aire—, se producen unas acciones de segregación a partir de las cuales las gruesas partículas de cuarzo, feldespatos y otras se van depositando en distintos lugares, mientras que las finas partículas arcillosas continúan con su proceso de arrastre a distancias mayores, hasta adentrarse en el mar y depositarse en lugares tranquilos, lo cual da origen a extensos depósitos sedimentarios. Es posible que algunos caolines y arcillas refractarias se encuentren en depósitos de origen marino. Otras arcillas se contaminan con material calcáreo, compuestos de hierro y otros elementos, lo que impide su aplicación en refractarios y porcelanas, aunque son muy útiles en la industria ladrillera (Maya, 2003).

2.2.4. Depósitos residuales (meteorización)

A esta clase de depósitos corresponden las arcillas que se han formado por meteorización y alteración y han tenido un desarrollo en el mismo sitio de la roca fuente. Generalmente están contaminadas por gran cantidad de roca inalterada de granos de sílice y de otros minerales resistentes a la meteorización, y el contenido de fracción arcillosa es muy variable. Las arcillas residuales más valiosas son los caolines y las arcillas caoliníticas, que suelen verse contaminadas únicamente por sus minerales primarios, que, sin embargo, se pueden remover con facilidad mediante lavado (Maya, 2003).

2.2.5. Depósitos en rocas con bajo grado de metamorfismo

Las rocas constituidas por material arcilloso que han sufrido un bajo grado de metamorfismo se pueden utilizar como arcillas estructurales (Maya, 2003).

2.3. Métodos de prospección

En general, la prospección debe hacerse —igual que con otros minerales— siguiendo las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada.

En la etapa de reconocimiento se identifican las áreas con potencial de mineralización, con base en los resultados de los estudios geológicos regionales, la inspección preliminar de campo y otros trabajos regionales.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el depósito que puede servir para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo y trabajos geofísicos que recurren preferentemente a métodos geoeléctricos; la cartografía geológica constituye el principal método de prospección.

La exploración general permite hacer la delineación inicial de los depósitos; los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, muestreo superficial, trabajos geofísicos complementarios, que incluyen métodos geoeléctricos, así como también la realización de apiques y algunas perforaciones.

La exploración detallada permite efectuar la delineación tridimensional detallada de los depósitos, y se hace por medio del muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones.

En los estudios previos hay que definir el comportamiento del grado de uniformidad de la secuencia que se va a explotar, la composición del material y el tamaño de los agregados, tanto en sentido lateral como vertical. Este estudio debe complementarse con una investigación de mercadeo que establezca la producción sistemática de la actividad minera. Es importante, además, realizar cálculos económicos, que afectan la actividad de remoción del material estéril que cubre el depósito y su traslado a los sitios de acopio.

Para el caso de la búsqueda de depósitos de material arcilloso, tanto en rocas estratificadas como en depósitos del Cuaternario, se planea una programación similar, ya que estas fases requieren de una investigación geológica-minera y química (reconocimiento geológico del depósito, forma, composición mineralógica y origen), donde los resultados definan las áreas, los sectores o bloques específicos que se explotarán en el futuro. Igualmente, es clave tener en cuenta los estudios geoambientales definidos en la normativa establecida por la autoridad minera.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

En la mayoría de los países, la arcilla y sus variedades se explotan normalmente en minas a cielo abierto, conocidas en el argot minero como *canteras*. Tal vez este sistema de explotación sea el que represente el mayor volumen en el conjunto de la minería mundial.

El método de la minería a cielo abierto, también llamado *minería superficial*, se define como el conjunto de las operaciones mineras requeridas para llevar a cabo la extracción de las rocas y minerales desde la superficie, realizando excavaciones en el terreno y abriendo las fosas o huecos necesarios. En general, después de la extracción del material arcilloso, este no es sometido a procesos de beneficio, pues lo común es que se utilice en su forma natural. Existen, no obstante, plantas de tratamiento que se localizan relativamente cerca de los sitios de explotación, donde se efectúan operaciones específicas, de acuerdo con las necesidades de la industria. Por ejemplo, para el *caolín* se realizan procesos de trituración, agitación con dispersantes, luego decantación, después un fraccionamiento con agua, separación de impurezas por métodos magnéticos, posteriormente una ultraflotación, luego tratamientos con ácidos, calcinación, flotación en aire, más adelante se efectúa un desgaste de las partículas por molienda, sigue un empapamiento, y al finalizar este proceso se llega a la delaminación.

Para otros tipos de arcilla, igualmente existen procesamientos que caracterizan sus aplicaciones. Así, a las *arcillas refractarias* se les practica trituración, calcinación y producción de pastas; la bentonita se somete a meteorización, secado, molienda, clasificación por tamaños, granulación y mezcla con aditivos para intercambio de cationes. Las *arcillas plásticas* pasan por secado, desmenuzamiento, pulverización y flotación en aire de las arcillas blanqueadoras, secado, molienda, tamizado y dispersión; por último, las *arcillas misceláneas*, son sometidas a trituración, agitación, compresión y secado (Núñez, 1987).

El concepto dinámico de la minería moderna obliga a llevar una investigación operativa continua y permanente de todas las áreas que podrían ser objeto de la futura explotación. En un puro sentido económico, entre 3 y 5 % del valor anual de las ventas debería destinarse a la recuperación de las reservas extraídas en el año en la explotación, de tal modo que se sustituyan las agotadas por otras nuevas, bien en la misma área o cuenca minera, bien en otras zonas o con otras sustancias minerales (Pla y Herrera, 2002).

2.5. Recursos, reservas y comercio

Las arcillas son fuente de incalculables recursos y reservas. Por ello puede decirse que la mayor parte de las naciones cuenta en mayor o menor cantidad y calidad con este recurso natural. Se calcula que cerca del 75 % de las áreas continentales corresponde a materiales arcillosos; con todo, es prudente aclarar que no en todos los países se explotan e industrializan con el mismo grado de desarrollo. No se publican estadísticas de producción mundial de arcillas, salvo de caolines y de las denominadas *arcillas especiales*, como la bentonita y tierra batán (*fuller's earth*).

La determinación de la producción mundial de caolín lavado o refinado sigue siendo problemática, ya que son numerosos los países que no aclaran si sus cifras de extracción corresponden a material bruto o procesado, o bien indican que son de producción bruta, pero no aclaran cuál es la cuantía del lavado. El caolín bruto o crudo puede ser objeto de transacción comercial a una planta de lavado de otra compañía, pero lo más común es que se consuma tal cual; por ello debe considerarse una arcilla caolinítica, equivalente quizás a las *ball-clay* anglosajonas, y no como caolín propiamente dicho.

En la Tabla 7 se muestra la producción mundial de caolín en el periodo 2011-2015, que se ha mantenido constante durante los últimos años, con un promedio anual de 25 millones de toneladas métricas, siendo Estados Unidos y China los principales productores, con un 37 % del mercado mundial (figura 4 y **5**).

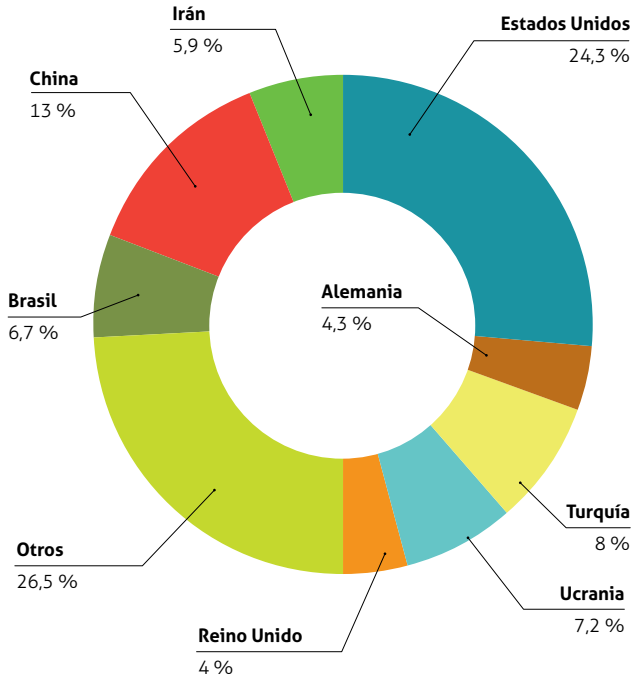

Figura 4. Participación en la producción de caolín en 2015
Fuente: BGS (2015)

En el año 2015, a escala mundial, se comercializó y se produjo caolín bruto en las siguientes proporciones: en Europa, 8 600 000 toneladas; en África, 580 000 toneladas; en Estados Unidos, 6 600 000; en Suramérica, 1 880 000 toneladas; en Asia, 7 300 000, y en Oceanía, 280 000 toneladas.

Tabla 7. Producción mundial de arcillas tipo caolín en el periodo 2011-2015

País	2011	2012	2013	2014	2015
Alemania	1 100 000	1 100 000	1 100 000	1 100 000	1 100 000
Turquía	1 229 352	988 081	1 027 189	734 072	2 032 103
Ucrania	1 353 555	1 217 909	1 179 380	1 426 447	1 814 786
Reino Unido	1 290 000	1 150 000	1 110 000	1 090 000	1 014 000
Estados Unidos	5 950 000	5 900 000	6 140 000	6 310 000	6 160 000
Brasil	1 927 000	2 388 000	2 139 000	2 055 000	1 700 000
China	3 200 000	3 300 000	3 300 000	3 300 000	3 300 000
Irán	1 500 000	1 503 377	1 000 000	1 879 943	1 500 000
Otros	7 150 000	6 950 000	6 900 000	6 400 000	6 700 000

Datos en toneladas métricas
Fuente: BGS (2015)

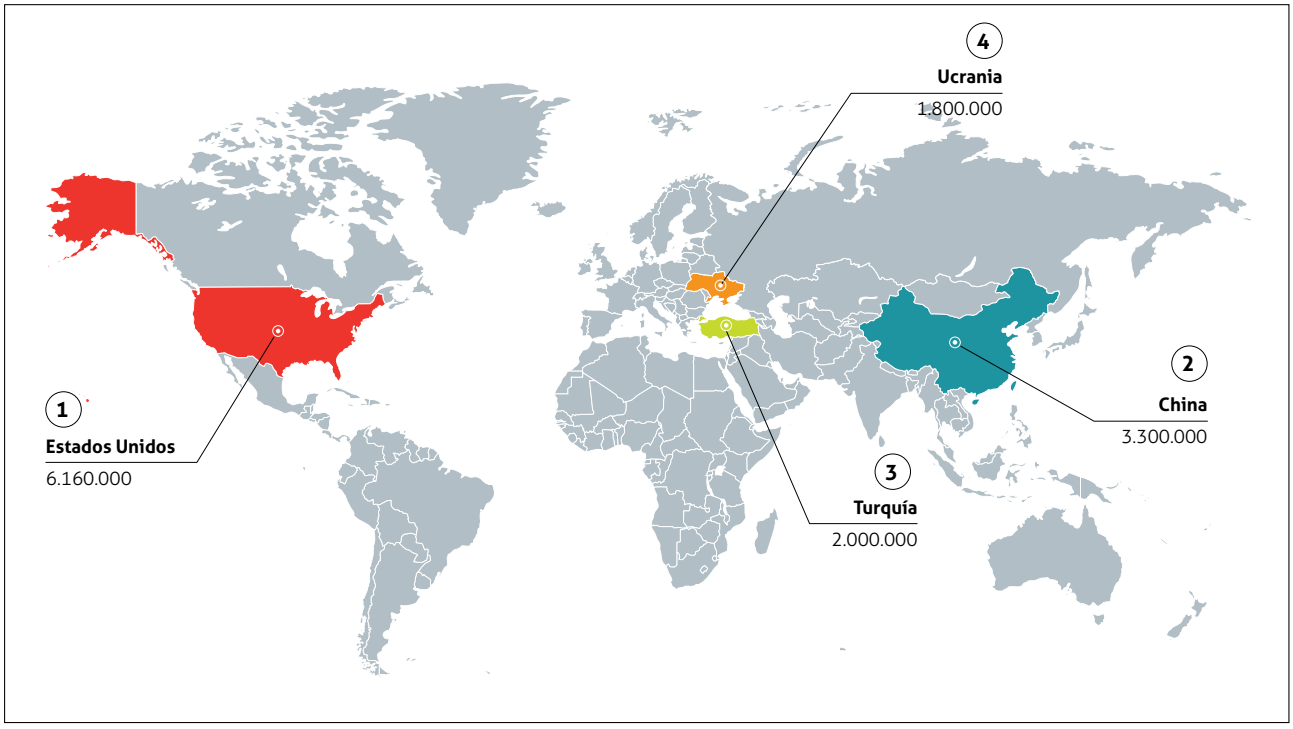

Figura 5. Principales países productores de caolín en el 2015
Fuente: BGS (2015)

En lo que respecta a las arcillas especiales, como la bentonita y tierra batán (*fuller's earth*), la mayoría de los países productores publican con mucho retraso las cifras de extracción, por lo que la determinación de la producción mundial en 2015 es meramente estimativa. Por otra parte, los criterios de clasificación de estas arcillas no son homogéneos: en algunos países no hay diferencias, en el Reino Unido las bentonitas cálcicas se incluyen en las *fuller's earth* o tierras de batán, y otros incluyen entre estas la atapulgita (paligorskita) y la sepiolita. Aparte de España, solo dos países informan de la producción de atapulgita, Senegal y Sudáfrica, y sobre la sepiolita, únicamente Turquía. En la tabla 8 se muestra la producción mundial por países, desde 2011 hasta el 2015.

Tabla 8. Producción de bentonita a escala mundial en el periodo 2011-2015

País	2011	2012	2013	2014	2015
Grecia	1 188 442	1 235 105	1 000 000	1 011 485	1 150 000
Turquía	471 528	1 033 568	622 872	1 088 444	3 134 911
Estados Unidos	4 950 000	4 980 000	4 350 000	4 800 000	4 320 000
China	3 500 000	3 500 000	3 600 000	3 500 000	3 500 000
India	1 157 000	1 188 000	1 305 000	1 327 000	1 466 000
Otros países	4 833 030	5 163 327	5 222 128	4 873 071	4 829 089

Datos en toneladas
Fuente: BGS (2015)

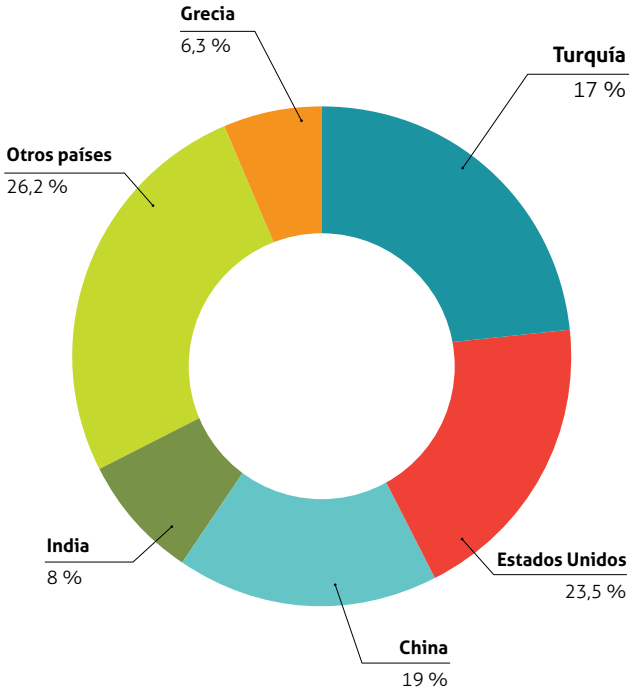

Figura 6. Participación en la producción mundial de bentonita en el año 2015
Fuente: BGS (2015)

La figura 6 expone la participación de diversos países en la producción mundial de bentonita en el año 2015. Se observa que Estados Unidos, China y Turquía suman el 60 % de la producción global.

Con relación a la producción mundial de Tierra Batan, en la tabla 9 se presenta la producción mundial para el periodo 2011- 2015, son pocos los países que dan a conocer estas estadísticas, se observa que Estados Unidos es el mayor productor de este tipo de arcillas en el planeta.

A continuación se muestran los precios internacionales de algunos tipos de arcilla en el periodo comprendido entre 2007 y 2016. De las arcillas comunes (figura 7) se tiene un precio promedio de USD 12.5 por tonelada; el caolín (figura 8) figuró con precios promedio de USD 130 por tonelada; la bentonita (figura 9) muestra un crecimiento constante, que en 2016 le permitió ubicarse en USD 74 por tonelada.

Tabla 9. Producción de tierra batan a escala mundial en el periodo 2011 - 2015

País	2011	2012	2013	2014	2015
Grecia	36 720	19 870	32 400	45 000	108 000
España	592 961	645 909	626 116	582 379	586 188
Senegal	179 900	180 500	234 600	191 400	188 400
México	107 436	227 496	306 507	245 147	240 000
Estados Unidos	1 950 000	1 980 000	1 990 000	1 990 000	1 970 000
Otros países	232 983	246 225	210 377	146 074	207 412

Datos en toneladas
Fuente: (BGS, 2015)

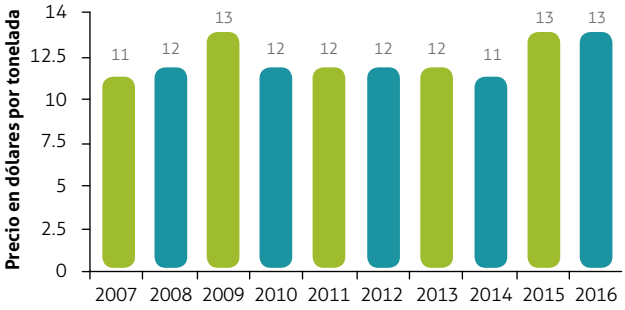

Figura 7. Precios internacionales de las arcillas comunes
Fuente: Statista (2017a)

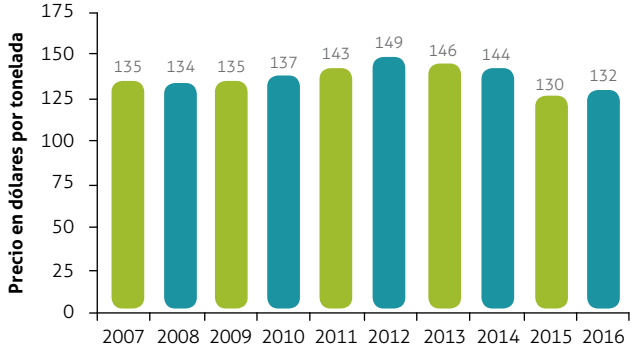

Figura 8. Precios internacionales del caolín
Fuente: Statista (2017c)

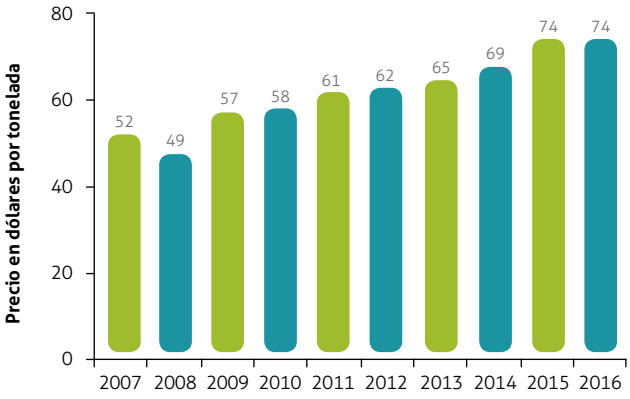

Figura 9. Precios internacionales de la bentonita
Fuente: Statista (2017b)

2.6. Perspectivas

El sector industrial cerámico mundial presenta la peculiaridad de que se organiza principalmente en torno a unas concentraciones territoriales, donde se localizan la mayoría de los agentes o industrias que participan en el sistema de creación de valor del producto final cerámico, tanto los fabricantes cerámicos como la industria proveedora de esmaltes, fritas (materia prima vítrea) y maquinaria cerámica, al igual que diversas instituciones públicas y privadas que apoyan el proceso de la industria. El desarrollo de estos clústeres cerámicos ha propiciado que el sector presente un alto grado de avance e innovación tecnológica en el ámbito mundial.

3. Arcillas en Colombia

3.1. Geología regional

En estudios regionales de exploración geológica de años pasados se ha determinado la presencia de unidades de roca que incluyen estratos arcillosos que afloran en gran parte del territorio nacional, donde gracias a evaluaciones preliminares se definieron calidades diferentes. En general, estas arcillas tienen un origen residual y transportado. Es posible que algunos depósitos arcillosos tengan un origen hidrotermal. Otros son formados por lavados de anteriores depósitos arcillosos con redepositación *in situ* que ha dado origen a depósitos coluviales.

Vale la pena mencionar que la evolución tectónica ocurrida a lo largo del tiempo —tal cual ha pasado entre la placa de Nazca y la de Suramérica, considerada la responsable de la intensidad de los procesos tectónicos activos como la subducción, formación de cordilleras, magmatismo calcoalcalino asociado (principal evento que determinó la aparición de los depósitos de arcillas), cuencas y cadenas volcánicas, reactivación y neoformación de estructuras corticales, y una intensa producción sísmica—, ha afectado el territorio colombiano (Ingeominas, 2006).

La actividad volcánica asociada a los Andes colombianos se inició en el Mioceno y se explica por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramérica. Este vulcanismo se ha dividido en dos etapas: la primera, de edad Mioceno medio-Pleistoceno, cuando se generaron grandes erupciones volcánicas que formaron depósitos de ignimbritas asociados a un vulcanismo extinto a parcialmente erodado, que constituyen la formación Guacacallo y flujos torrenciales que dieron origen al lahar Altamira en la plancha 388 Pitalito.

La segunda etapa del vulcanismo en los Andes colombianos se caracteriza por presentar estructuras fácilmente distinguibles, correspondientes a los volcanes activos, que se ubican en la cima de la cordillera Central y en la depresión interandina del Cauca-Patía. Esta etapa se ha subdividido a su vez en tres períodos: el primero corresponde al vulcanismo de la cordillera Central, que dio como resultado el desarrollo de los grandes depósitos de la formación Popayán, cuya fuente pudo ser la megaestructura caldérica del Paletará (Torres *et al.*, 1999). El segundo período se caracteriza por la aparición de una nueva estructura que evolucionó hasta el estado caldérico, conocida como la *caldera de Chagartón*, a la cual están asociados flujos de ceniza y pómez que actualmente se relacionan con el miembro Chagartón de la formación Coconucos (Monsalve, 2000). En el tercero se presenta la construcción de la base de los actuales centros eruptivos, cuyos productos conforman los miembros río Negro y San Francisco de la formación Coconucos (Marquínez *et al.*, 2002).

En desarrollo de estos procesos se formaron las tres cordilleras del sistema andino colombiano, denominadas Oriental, Central y Occidental, cuyas características las hacen diferir unas de otras. Por ejemplo, la cordillera Oriental es dominada básicamente por rocas sedimentarias clásticas, bioclásticas y, en menor proporción, metamórficas y cuerpos ígneos. La sucesión de unidades estratigráficas de mejores perspectivas para las arcillas en esta cordillera se encuentra relacionada con rocas del Terciario y el Cuaternario y, en menor proporción, con rocas del Cretáceo. Las secuencias sedimentarias más representativas y potenciales son la formación Chipaque y el grupo Guadalupe, de edad cretácica, y las formaciones Gualanday, Guaduas, Bogotá, Usme, Seca, Soacha Superior, Cuervos, León, y el grupo Guayabo, de edad Terciaria.

Geológicamente, la cordillera Central está constituida en un gran porcentaje por rocas ígneas, metamórficas y volcánicas. Una pequeña fracción está compuesta por las sedimentitas de la formación Amagá, considerada de edad Neógena, que se extiende a los departamentos de Antioquia, Caldas y Risaralda. El miembro superior de esta unidad constituye una fuente potencial para la extracción de arcillolitas. El batolito Antioqueño, del Cretáceo Tardío, está asociado a la subprovincia metalogénica denominada Antioquia (Salinas, Rodríguez, Lozano y Solano, 1999); el *stock* de Amagá y el neis de La Miel constituyen fuentes importantes de depósitos de arcillas. Hacia el sur, en la zona de los departamentos del Tolima y Huila, las formaciones Gualanday, Honda y Mesa son fuentes para la obtención de arcillas, y arcillas residuales provenientes de cuerpos ígneos intrusivos y extrusivos que se han desarrollado en estas áreas, así como en algunas zonas de influencia de los departamentos de Quindío y Risaralda.

En la zona norte del departamento del Cauca hay presencia de caolín asociado a cuerpos intrusivos de composición dacítica y depósitos de cenizas volcánicas. Estas manifestaciones se ubican especialmente en los municipios de Morales y Santander de Quilichao, sobre todo en los aluviones recientes del río Cauca; además, en los sectores de Popayán y El Bordo se reportan depósitos de arcillas plásticas.

En los alrededores de Cali se explotan arcillas de edad Terciaria, algunas de ellas de tipo coloidal, y en el sector de Tuluá, arcillas bentónicas asociadas a la provincia metalogénica de Cauca-Romeral.

Procesos de meteorización intensos afectaron estas rocas y originaron depósitos residuales de material arcilloso que se han localizado en los departamentos de Nariño, Cauca, Valle, Tolima, Huila, Quindío, Risaralda, Caldas y parte de Antioquia. En general, se puede decir que estos procesos han originado las denominadas lomas denudativas, que se caracterizan por formar pendientes suaves, de morfología ondulada, y que por lo regular están cubiertas por suelo orgánico (caolinítico) generado a partir de material tobáceo. Algunos de estos materiales están relacionados con la formación Saldaña. Asimismo, se pueden originar mesetas piroclásticas, comúnmente asociadas a flujos de lava con intercalaciones de tobas, arcillas y cenizas volcánicas (Marquínez *et al.*, 2002).

Vale la pena anotar que en Colombia el ambiente propicio para explorar arcillas de tipo esmectítico es precisamente la cordillera Central, donde afloran unidades de rocas tanto sedimentarias como volcánicas relacionadas con el Paleógeno y el Neógeno. En este sentido, las formaciones La Paila y Zarzal, en el Valle, y las formaciones Gualanday, Honda y La Mesa, en el Tolima, se consideran secuencias sedimentarias potencialmente de interés para prospectar arcillas especiales (Camacho y Celada, 2004). Los medios sedimentarios propicios para la formación de esmectitas son aquellos medios ricos en magnesio y medios alcalinos pobres en potasio, asociados a climas secos.

La cordillera Occidental está conformada predominantemente por rocas volcánicas de composición basáltica y diabásica, y en menor proporción por rocas metamórficas y sedimentarias. Las rocas basálticas y diabásicas han sido sometidas a intensos procesos de meteorización, descomposición que ha dado como resultado abundantes depósitos residuales de arcillas rojas. Algunas rocas sedimentarias podrían ser de interés local para arcillas, como los niveles de arcillolitas de las formaciones Guachinte, Ferreira y Esmita. En el departamento de Nariño existen manifestaciones de caolinitas, especialmente en jurisdicciones de los municipios de El Tambo, San Lorenzo, La Cruz, San Pablo, Barbacoas, Funes, Imués, Maquí y Pasto (Núñez, 1987).

En Colombia también son importantes algunos depósitos del Cuaternario, como las formaciones Sabana, Tilatá y Subachoque, en Cundinamarca, al igual que algunos depósitos de terraza, aluviales y coluviales que se han desarrollado en diversos departamentos del país. Estos depósitos se mencionarán en el capítulo referente al distrito minero Sabana de Bogotá.

3.2. Geología local

Como se anotó, los yacimientos están relacionados con un origen bien sea sedimentario o residual, aunque algunos pueden estar asociados a pulsos hidrotermales. Las unidades sedimentarias de Colombia constituyen grandes superficies, y dependiendo de su ubicación con respecto a los centros urbanos principales se pueden considerar fuentes potenciales de explotación para su aprovechamiento económico.

Atendiendo a la categorización de la UPME (2005), en general, el volumen de producción de arcillas en las diferentes regiones del país no supera los cinco millones de toneladas, por lo que las explotaciones del país se pueden considerar en la categoría II. Dicha categorización se hizo con base en términos de reservas, volumen de producción, mercado de destino, tipo de mineral y tradición minera de las comunidades locales y regionales, y diferenció veintiséis distritos mineros agrupados en tres categorías, ordenadas de mayor a menor volumen de producción, así:

- Grupo I. Distritos con un volumen de producción superior a cinco millones de toneladas anuales.
- Grupo II. Distritos con escalas de mediana producción, inferior a cinco millones de toneladas anuales.
- Grupo III. Distritos productores de metales preciosos y esmeraldas.

En la descripción de cada distrito se darán su localización, descripción de las unidades portadoras de arcillas, producción, reservas y proyecciones de oferta.

3.2.1. Distrito minero Sabana de Bogotá

Está constituido por el distrito capital de Bogotá, sus municipios anexos de Bosa, Funza, Suba, Usaquén, Usme y los municipios de Bojacá, Chía, Gachancipá, Guasca, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque, Tabio, Tenjo, Cota, Zipaquirá y Tocancipá, todos comunicados por carreteras en buen estado de conservación. En este distrito afloran formaciones geológicas sedimentarias de los períodos Cretáceo a Neógeno, así como depósitos cuaternarios que son un potencial de reservas de arcilla industrial. Posteriormente se mostrará el esquema que hace referencia a este distrito (figura 10).

En el distrito minero Sabana de Bogotá, las arcillas que son objeto de explotación provienen principalmente de unidades terciarias, correspondientes a las formaciones Guaduas y Bogotá; además, son fuente algunos depósitos cuaternarios, como las formaciones Tilatá y Sabana. A continuación se dan las principales características de estas unidades geológicas, de la más antigua a la más reciente:

3.2.1.1. Formación Guaduas (niveles arcillosos)

Son arcillolitas a veces limosas, de color gris a gris amarillento en su parte inferior, gris oscuro en su parte media y rojizo abigarrado, amarillo rojizo a grasoso en su parte superior. Desde el punto de vista cerámico, los niveles arcillosos de la formación Guaduas son muy útiles para la producción de artículos de gres (tubos, ladrillos, tejas), aunque dada su alta plasticidad y abundante contenido de illita y montmorillonita, siempre deben mezclarse con materiales desgrasantes y menos plásticos, que además le aporten resistencia mecánica al producto terminado.

En crudo y quemados, los productos preparados con estas arcillas siempre ofrecerán un color rojo, amarillo, ocre o negro, dados los altos contenidos de óxidos ferroso y férrico. Se explotan principalmente en el sur de la capital, en los sectores de San Cristóbal y Tunjuelito, en Soacha, sector de Funza; al norte de Zipaquirá, en Cogua, Checua, Nemocón, y en los alrededores de la vía a Tunja.

Para determinar algunos comportamientos de las arcillas es necesario efectuar los análisis químicos que, combinados con los análisis mineralógicos, pueden suministrar valiosos conocimientos para la formulación de pastas y el control del proceso. En la tabla 10 se presenta un cuadro de composición química para diferentes aplicaciones cerámicas.

Tabla 10. Composición química para diferentes aplicaciones cerámicas

Composición química	Alfarería común	Ladrillo refractario	Tubería gres
SiO_2	57.7-63.1	54.78-78.00	64.1-8.3
Al_2O_3	27.1 -21.6	39.1-17.2	20.5-9.1
Fe_2O_3	6.1 -21.6	2.7-1.3	0.2-1.1
TiO_2	—	—	0.1-1.8
CaO	5.6-0.4	1.5-0.0	2.0-1.0
MgO	0.1-0.5	1.1-0.8	0.0-0.3
K_2O	0.2-2.0	1.6-2.0	0.9-1.8
Na_2O	O.2-2.0	—	0.3-2.0
CO_2	—	—	—
H_2O	—	—	—
PPI	3.2-9.4	—	13.7

Fuente: Rodríguez (1998)

A continuación se reportan los datos máximos, mínimos y promedio de los análisis químicos de algunos niveles arcillolíticos de la formación Guaduas, expresados como porcentajes de óxidos, al igual que el valor en porcentaje de la humedad (tabla 11).

Tabla 11. Composición química de las arcillas de la formación Guaduas

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	63.34	54.37	60
Fe_2O_3	7.69	2.81	5.78
Al_2O_3	24.35	17.32	19.74
CaO	0.36	0.19	0.27
MgO	1.65	1.12	1.26
Na_2O	0.3	0.19	0.25
K_2O	1.69	1.22	1.44
TiO_2	1.16	0.85	1
MnO_2	0.13	0.02	0.04
Cr_2O_3	0.03	0.03	0.03
NiO	0.04	0.01	0.02
H	3.12	1.34	2.2
Pérdida por calcinación	10.34	5.8	7.4
Total	99.97	98.15	99.45

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

De acuerdo con estos análisis, se ha establecido que en las arcillas de la formación Guaduas el porcentaje de sílice a menudo es menor que el 60 % requerido, así como el contenido de alúmina es inferior al 24 % necesario para el uso en la industria alfarera, por lo que en estos casos hay que efectuar mezclas con otros tipos de arcillas. En ocasiones, estas arcillas incluyen contenidos de sales y sulfatos, lo cual puede ocasionar problemas de eflorescencias después de cocidos (Espitia *et al.*, 2003).

Desde el punto de vista mineralógico, estas arcillas muestran la siguiente secuencia, donde se establece la abundancia en relación con el contenido de minerales arcillosos: caolinita > illita > esmectita > clorita. En general, la caolinita se presenta entre 13.8 y 36.56 %; la illita, entre 8.58 y 20.16 %; la esmectita, entre 6.8 y 13.7 %, y la clorita, entre 6.8 y 13.7 %.

Las características de las aptitudes de las arcillas de la formación Guaduas, expresadas en Espitia *et al.* (2003), indican que son útiles para la producción de ladrillos toletes, bloques, tejas, tubos y ladrillos perforados. De acuerdo con el diagrama de plasticidad de Casagrande, todas las arcillas de la formación Guaduas se consideran de mediana plasticidad.

3.2.1.2. Formación Bogotá

La unidad consta de una sucesión monótona de arcillolitas de colores grises, verdes, rojos y abigarrados, intercalados esporádicamente por algunos niveles de arenitas de cuarzo, grano fino a muy fino, poco cementado, friable, de color amarillo verdoso, en capas de hasta de 2.50 m de espesor. Los niveles arcillosos utilizados en la industria de la construcción corresponden a arcillas masivas, deleznables, de colores abigarrados a grises, a veces limolíticas. Estos niveles arcillolíticos se presentan en la parte inferior y en la parte superior de la unidad.

Más adelante se muestran los valores de los análisis químicos correspondientes a esta formación, reportados en porcentajes de óxidos, tanto para el nivel inferior como el superior (Tabla 12 y Tabla 13).

Como se puede observar, en el nivel superior, en los valores máximos y mínimos se advierte un tenor de sílice que oscila entre 64.82 y 66.63 %; estos contenidos altos limitan un tanto su uso en alfarería común. En cuanto al contenido de alúmina, varía entre 16.87 y 18.85 %, lo cual indica que se encuentran por fuera del rango requerido.

Tabla 12. Composición química de las arcillas de la formación Bogotá, nivel inferior

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	66.63	64.82	65.61
Fe_2O_3	6.26	2.53	5.15
Al_2O_3	18.85	16.87	17.82
CaO	0.24	0.17	0.2
MgO	1.2	0.71	0.88
Na_2O	0.6	0.19	0.35
K_2O	1.45	0.97	1.19
TiO_2	2.13	0.8	1.12
MnO_2	0.06	0.02	0.04
Cr_2O_3	0.01	0.01	0.01
NiO	0.04	0.01	0.02
H	2.46	1.27	1.68
Pérdida por calcinación	6.77	5.18	5.76
Total	99.9	99.75	99.83

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Tabla 13. Composición química de las arcillas de la formación Bogotá, nivel superior

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	74.87	58.09	65.61
Fe_2O_3	9.87	0.87	4.77
Al_2O_3	25.16	11.65	17.63
CaO	0.67	0.05	0.23
MgO	1.4	0.38	0.8
Na_2O	1.21	0.12	0.41
K_2O	1.92	0.63	1.28
TiO_2	1.14	0.79	0.96
MnO_2	0.14	0	0.04
Cr_2O_3	0.09	0.01	0.03
NiO	0.19	0	0.02
H	3.2	0.65	1.95
Perdida por calcinación	8.64	3.51	5.74
Total	99.97	98.53	99.49

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Con base en análisis de laboratorio se pudo establecer esta secuencia en relación con el contenido de minerales arcillosos: caolinita > illita > esmectita > clorita. En ocasiones, el contenido de esmectita es mayor que el de illita y clorita. El contenido de caolinitas varía entre 21 y 30 %; illitas, entre 10 y 13.7 %; esmectitas, entre 14.6 y 3.7 %, y clorita, entre 5.0 y 7.8 %. El contenido total de minerales arcillosos es en promedio de 51 %; el de cuarzo libre es de

36.6 %, y los feldespatos varían entre 1.6 y 5.06 % (Espitia *et al.*, 2003).

De acuerdo con los datos expuestos, se ha establecido que estas arcillas son útiles para la fabricación de ladrillos macizos, así como de tejas, tubos y ladrillos perforados. Según la Carta de Plasticidad de Casagrande, dichas arcillas se consideran de mediana plasticidad, y cuando el contenido de esmectita es mayor, la plasticidad aumenta.

En el nivel inferior, los resultados muestran un contenido de sílice que varía entre 74.87 y 58.09 %, y presenta un promedio de 65.61 %; los contenidos de alúmina oscilan entre 25.16 y 11.65 %, para un promedio de 17.63 %, lo que indica que son aptas para usarlas en la industria de la alfarería; sin embargo, algunos niveles presentan bajo contenido de alúmina, lo cual exige una mezcla previa entre ellas para acondicionarlas al uso deseado.

El análisis próximo mineralógico de la formación Bogotá, nivel superior, indica una secuencia de abundancia en relación con los minerales arcillosos caolinita > illita > esmectita > clorita; sin embargo, en algunos sitios la presencia de esmectita es mayor que la de las illitas. El contenido de minerales arcillosos varía entre 31 y 70.5 %, con un promedio del 50.75 %. El valor promedio general de feldespato es de 3.2 %. La relación de los contenidos promedio de minerales arcillosos a cuarzo es de 1.32 (Espitia *et al.*, 2003). De acuerdo con los resultados obtenidos con la Carta de Plasticidad de Casagrande, se deduce que estas arcillas presentan en menor proporción plasticidad baja, alguna plasticidad alta, y la mayoría se consideran de mediana plasticidad.

3.2.1.3. Formación Regadera

A pesar de ser dominantemente arenítica, incluye niveles de arcillolitas por lo general de color gris a pardo, masivo, deleznable, intercalados con niveles limolíticos y niveles delgados de arenisca de color grisáceo. En algunos sectores se explotan estos niveles para la obtención de arcillas cerámicas. No se tienen datos de análisis físico-químicos de esta formación.

3.2.1.4. Formación Sabana

Este término se refiere al complejo de materiales limosos y arcillosos del borde de terraza, que tienen un claro origen lacustre y que conforman la parte más superficial de la actual altiplanicie de la sabana de Bogotá. Asimismo, es necesario mencionar los depósitos de la formación Tilatá, que son parte de la secuencia cuaternaria de esta altiplanicie y que, de acuerdo con Julivert (1961), se aplican a los rellenos compuestos por cantos gruesos y bloques, en especial del valle del río Tunjuelito, que forman unos grandes conos en la sabana, cuya expresión morfológica es una terraza baja. Esta formación ha sido reconocida en el norte, hacia Chocontá, e incluso en los alrededores de Tunja, donde incluye niveles arcillosos. En la tabla 14 se muestran los resultados de los valores máximos, mínimos y promedio de los análisis químicos correspondientes a las arcillas de la formación Sabana.

Tabla 14. Composición química de las arcillas de la formación Sabana

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	72.52	64.38	68.56
Fe_2O_3	6.51	3.35	5.43
Al2O3	18.46	13.99	15.61
CaO	0.12	0.06	0.08
MgO	1.05	0.54	0.68
Na_2O	0.21	0.11	0.16
K_2O	1.57	0.51	1.05
TiO_2	1.41	0.87	1.03
MnO_2	0.05	0.02	0.03
Cr_2O_3	0.03	0.01	0.02
NiO	0.03	0.01	0.02
H	2.11	0.62	1.34
Pérdida por calcinación	6.32	4.57	5.46
Total	99.82	98.52	99.46

Fuente: Espitia ***et al.*** (2003)

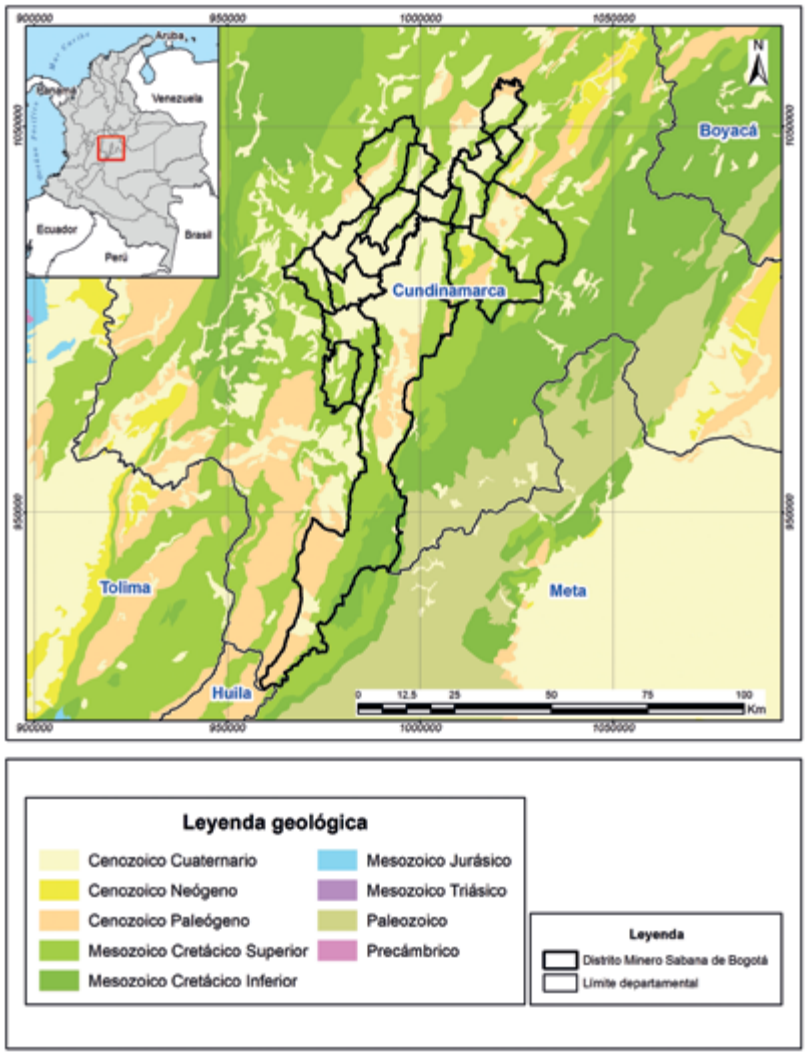

Figura 10. Distrito minero Sabana de Bogotá
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

Según algunos análisis reportados por Espitia *et al.* (2003), las arcillas muestran una composición química que se caracteriza por un contenido alto de sílice, entre 64.38 y 72.52 %, y un tenor bajo de alúmina, lo cual las hace aptas para su uso en alfarería común.

Desde el punto de vista del análisis mineralógico, las arcillas de la formación Sabana evidencian una secuencia en relación con el contenido de minerales arcillosos, así: caolinita > illita > esmectita > clorita. El contenido de caolinita está entre el 23 y el 31 %; el total de los minerales arcillosos varía entre el 38 y el 54 %, y el feldespato oscila entre el 1 y el 2 %. Con base en estos análisis, se considera que dichas arcillas tienen una aptitud cerámica para emplearlas en la fabricación de tejas, tubos y ladrillos perforados. Algunas arcillas pueden utilizarse, mediante mezclas, en la producción de ladrillos macizos, toletes y bloques. Estas arcillas se consideran de mediana plasticidad (Espitia *et al.*, 2003).

Las arcillas que se extraen en la localidad de Tabio se usan para la fabricación de ladrillos refractarios de segunda clase y para cerámica fina. Las arcillas que se explotan en las cercanías de Guatavita-Guasca y en San Miguel (vía Sibaté-Fusagasugá) se emplean para la producción de porcelana sanitaria.

En el departamento de Cundinamarca, la producción de arcillas y arcillas cerámicas corresponde a 715 391.72 y 433 853.04 toneladas, respectivamente, como se expone en la tabla 15.

Tabla 15. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en el departamento de Cundinamarca

Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Bogotá, D. C.	715 391.72	433 853.04
Agua de Dios		
Cogua		
Girardot		
Guasca		
Guatavita		
Mosquera		
Nemocón		
Ricaurte		
Simijaca		
Soacha		
Susa		
Tabio		
Tausa		
Villa de San Diego de Ubaté		
Zipaquirá		

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.2. Distrito minero Luruaco

Este distrito abarca la actividad minera de calizas, materiales de construcción y arcillas que tiene lugar en los municipios de Luruaco, Repelón y Puerto Colombia, en el departamento del Atlántico, y en los municipios de Turbaná, Turbaco, Arjona y Cartagena, en el departamento de Bolívar. Las vías de comunicación están representadas por la carretera marginal de la costa caribe, que une La Guajira con Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, además de carreteras secundarias óptimas para el transporte. Más adelante se presenta el área de influencia de dicho distrito minero (figura 11).

Geológicamente se ha establecido que los depósitos de arcilla de este distrito son de origen sedimentario y están incluidos en sedimentos de edad reciente. Como situación general, en la región caribe se presentan extensos depósitos cuaternarios que contienen niveles arcillosos, de tipo aluvial, de ladera, de playa, lacustres y eólicos. En los alrededores de Barranquilla, Galapa y Baranoa se explotan algunos niveles de poco espesor, asociados a depósitos coluviales y aluviales, estos últimos asociados al río Magdalena.

En Malambo se utilizan arcillas de depósitos eólicos, en tanto que en Cartagena y Clemencia se extraen las arcillas del nivel detrítico inferior de la formación Popa, de edad Cuaternaria y origen continental de laderas. Igualmente, son fuente de este material ciertos depósitos recientes de origen marino. Tanto los depósitos continentales como los marinos se consideran un potencial de reserva relativamente alto. Es de anotar que las arcillas de playa de este distrito ofrecen muy altos contenidos de cuarzo y, por ende, poca plasticidad, lo que genera un producto rígido, con un alto grado de fractura y craquelamiento; además, una vez cocido ofrece baja resistencia mecánica (Rodríguez, 2002).

La producción de arcillas y arcillas cerámicas en los departamentos de Atlántico y Bolívar corresponde a 89 412.43 y 24 566.00 toneladas, respectivamente, como se refleja en la tabla 16.

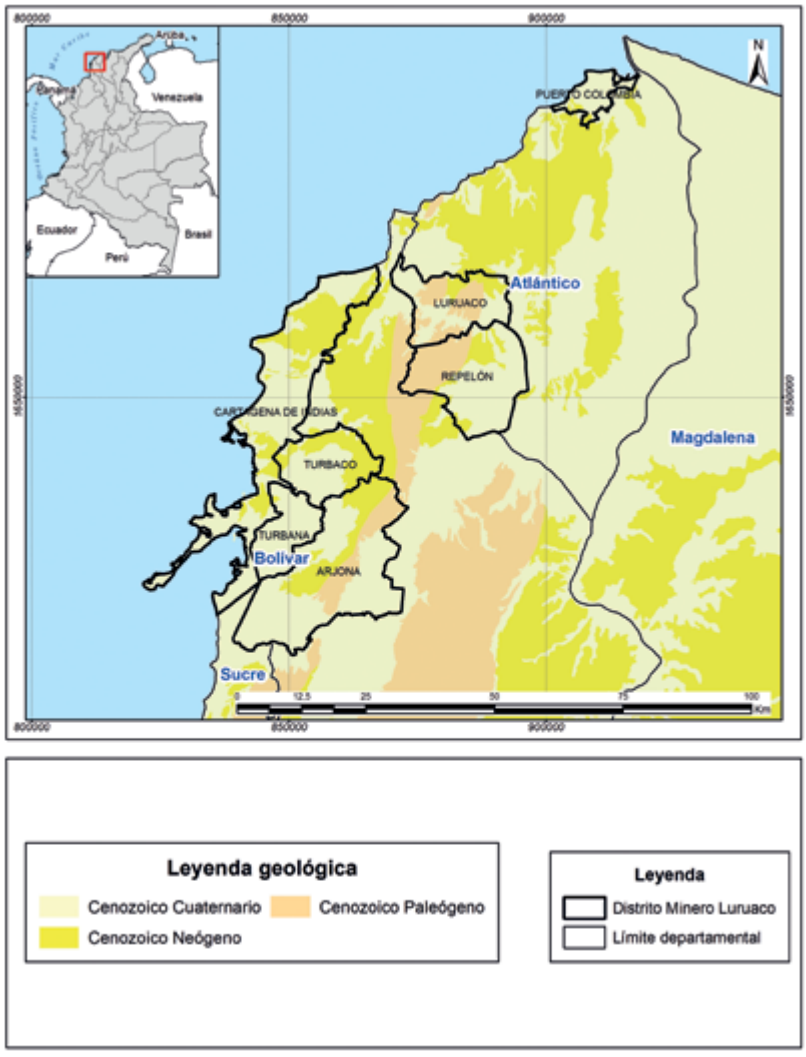

Figura 11. Distrito minero Luruaco
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

Tabla 16. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en los departamentos de Atlántico y Bolívar

Departamento	Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Atlántico	Tubará	89 412.43	24 566.00
Bolívar	Cartagena		
	Arroyohondo		

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha.
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.3. Distrito minero Ataco-Payandé

Este distrito forma parte del territorio del departamento del Tolima y comprende la zona de actividad minera localizada en los municipios de Ataco, Chaparral, Coello, Coyaima, Carmen de Apicalá, Espinal, Flandes, Guamo, Ibagué, Melgar, Rovira, Saldaña, San Luis y Valle de San Juan (figura 12). El distrito cuenta con la carretera que une a Ibagué con Bogotá, de donde se desprenden otras carreteras secundarias, generalmente pavimentadas. En el Tolima, algunos de los depósitos de arcillas se han clasificado como residuales, producto de la meteorización de cuerpos ígneos intrusivos, extrusivos y metamórficos, y además algunos suelos se han desarrollado sobre depósitos aluviales y de derrubio. Otros depósitos están relacionados con un origen sedimentario o transportado, y con sedimentitas del Neógeno, que incluyen las formaciones Honda, Mesa y Gualanday. Esporádi-

camente se aprovecha la formación Guadalupe, de edad Cretácea, para extraer material arcilloso. Se describen a continuación las unidades geológicas principales que son consideradas fuentes de arcilla para ladrillería, como son el batolito de Ibagué y las formaciones sedimentarias La Seca y Gualanday (Espitia *et al.*, 2003).

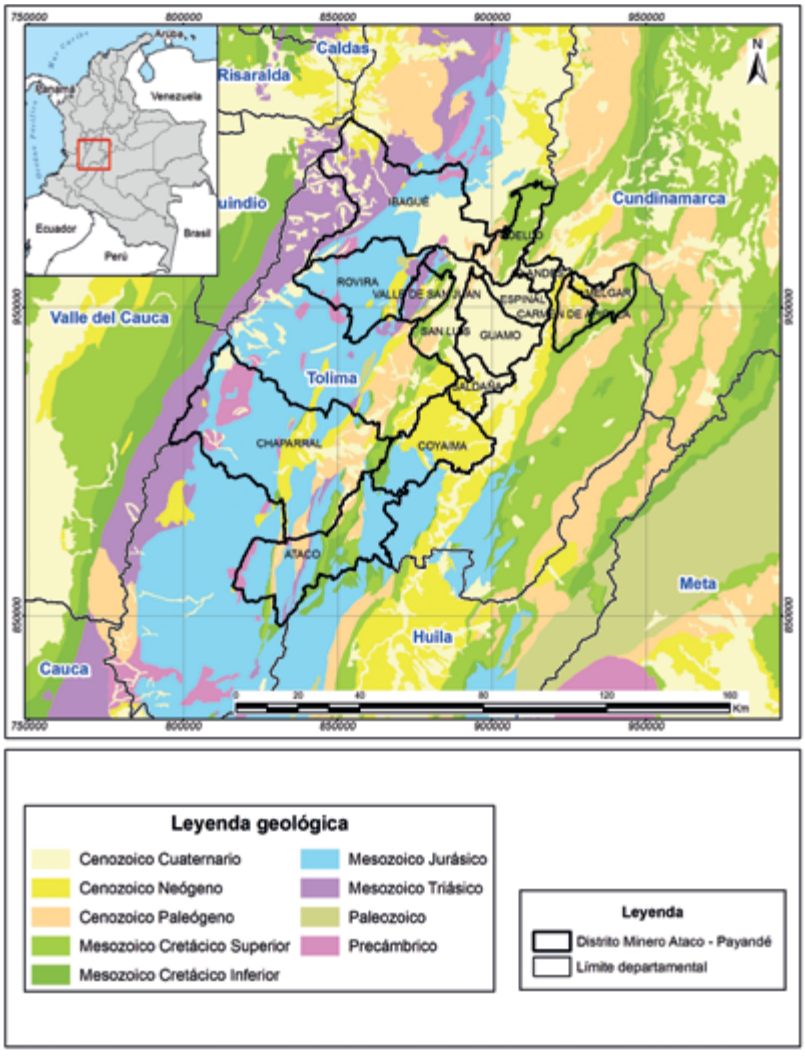

Figura 12. Distrito minero Ataco-Payandé
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

3.2.3.1. Batolito de Ibagué

Corresponde a un cuerpo intrusivo del Jurásico Superior, que se extiende desde el norte del departamento del Tolima hasta los alrededores del municipio de La Plata, en el departamento del Huila. Se caracteriza por presentar gran variedad composicional a lo largo y ancho de sus afloramientos. En él se ha determinado la presencia de granodioritas, tonalitas, cuarzodioritas, granitos y cuarzomonzonitas.

Este cuerpo intrusivo se presenta por lo general parcialmente meteorizado, formando saprofitos (suelos) arcillosos-arenosos, razón por la cual se ha considerado de tiempo atrás como fuente de arcillas para ladrillería. Los factores que han permitido la producción de arcillas han sido, por un lado, la formación de minerales de arcilla a partir de la fuerte meteorización química de la roca, en particular de los feldespatos, que finalmente forman caolines, y por otro lado la acumulación de estas rocas meteorizadas en zonas de baja pendiente, a veces transportadas, en cercanías de la ciudad de Ibagué, su principal fuente de consumo (Espitia *et al.*, 2003).

Vale la pena mencionar cómo la meteorización de estas rocas ígneas formó depósitos relativamente importantes de caolines, pero a la vez esta meteorización originó segregación de granos gruesos, sobre todo cuarzos, feldespatos no

meteorizados y micas. Esta situación en los procesos de las pastas cerámicas altera algunas propiedades físicas, como ausencia de plasticidad, heterogeneidad de tamaños de grano, tiempo y afectación de la temperatura de cocción.

Las explotaciones están localizadas cerca de Ibagué, ciudad que en general demanda prácticamente la totalidad de la producción. En la actualidad existen restricciones ambientales relacionadas con la explotación de estas arcillas, pues la zona está sometida a los planes de ordenamiento y manejo ambiental, que restringen el desarrollo de futuras explotaciones. Por otro lado, el mercado exige una mayor calidad del producto terminado, que no se logra con este tipo de materias primas.

En la tabla 17 se muestran los valores de los análisis químicos correspondientes a este batolito, reportados en porcentajes de óxidos.

Tabla 17. Composición química de las arcillas del batolito de Ibagué

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	62.43	51.53	47.54
Fe_2O_3	4.11	6.15	10.71
Al_2O_3	16.95	23.02	19.68
CaO	1.76	0.73	4.58
MgO	1.12	1.27	4.93
Na_2O	3.33	0.94	2.42
K_2O	1.32	0.86	0.63
TiO_2	0.82	1	1.24
MnO_2	0.17	0.1	0.17
Cr_2O_3	0	0	0
NiO	0.01	0.03	0.03
H	1.54	3.88	1.76
Pérdida por calcinación	3.53	8.5	4.95
Total	97.09	98.01	98.64

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Los resultados de análisis químicos realizados a algunas muestras colectadas en el batolito de Ibagué ponen de presente un contenido de sílice que varía entre 47.5 y 62.5 %, y de alúmina que oscila entre 16.9 y 23.02 %, valores que no permiten su utilización en alfarería común ni en tubería de gres. Los minerales arcillosos presentes son caolinita, illita, esmectitas y clorita y su relación de abundancia es caolinita > esmectita > illita> clorita; caolinita > illita > esmectita > clorita y clorita > esmectita > caolinita > illita.

Las muestras de los conos aluviales presentan contenidos de sílice que varían entre 53 y 58 % y de 18.9 a 24.7 % de alúmina. Con tales valores, estas arcillas se podrían aceptar para alfarería por el contenido de alúmina, a pesar de que el contenido de sílice es bajo. Por otra parte, los contenidos de hierro, titanio, calcio, magnesio, sodio y potasio muestran ligeras variaciones y se ajustan a los límites propuestos para la composición de arcillas aplicables a la alfarería común.

La aptitud cerámica de las arcillas originadas en el batolito de Ibagué muestran que en general pueden emplearse en la producción de tejas, tubos o ladrillos perforados y también, dependiendo del tipo de arcilla, en la fabricación de ladrillos macizos. Algunas arcillas tienen alto contenido de anortita y feldespato, lo cual hace necesario mezclarlas para adaptarlas al uso que se destine.

3.2.3.2. Formación Seca

Con este término se designa una secuencia constituida hacia la parte inferior por una sucesión de arenitas de cuarzo de grano fino en capas gruesas, que alternan con limolitas y lodolitas silíceas de color rojizo. La parte superior corresponde a una secuencia monótona de lodolitas y limolitas de colores rojizos a grises claros, que incluyen capas delgadas de carbón y niveles de arenitas finas. La unidad alcanza un espesor que varía entre 250 y 300 m, y se le ha asignado una edad Maastrichtiano-Paleógeno.

Debido al tamaño de grano fino, a la homogeneidad y espesor de los estratos de limolita y arcillolita, la sucesión superior se constituye en una fuente importante de arcillas que pueden utilizarse en ladrillería. En la tabla 18 se pueden apreciar los valores promedio de los análisis químicos que caracterizan las arcillas de esta formación.

Tabla 18. Composición química de las arcillas de la formación Seca

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	66.51	61.12	63.36
Fe_2O_3	6.67	5.44	6.23
Al_2O_3	18.67	14.18	16.07
CaO	1.01	0.26	0.55
MgO	1.99	0.78	1.38
Na_2O	0.81	0.16	0.41
K_2O	1.21	0.97	1.04
TiO_2	0.92	0.75	0.84
MnO_2	0.19	0.05	0.12
Cr_2O_3	0.03	0.01	0.01
NiO	0.04	0.01	0.02
H	3.44	1.9	2.94
Pérdida por calcinación	6.6	5.62	6.27
Total	99.81	98.16	99.25

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Según los análisis próximo-mineralógicos expuestos por Espitia *et al.* (2003), la concentración de minerales arcillosos en esta formación varía de 41 a 55 %, y la de cuarzo libre fluctúa entre 32.5 y 39.4 %, con excepción de una muestra que presenta 42 %. La abundancia de los minerales arcillosos sigue en general la secuencia caolinita > esmectitas > cloritas > illitas. La caolinita y la esmectita se hallan en concentraciones de 16 y 14 %, en su orden. El nivel de minerales de hierro expresados como hematita varía entre 5.1 y 6 %. Los contenidos de feldespatos aparecen en un rango de 1.35 a 6.84.

La aptitud cerámica de los niveles arcillosos de la formación Seca muestra que pueden emplearse para la fabricación de tejas, tubos y ladrillos perforados, así como para bovedillas. Algunas de estas arcillas pueden usarse en mezclas con arcillas plásticas. Estas arcillas se pueden clasificar como de alta a mediana plasticidad.

3.2.3.3. Grupo Gualanday

Este grupo se ha dividido en tres formaciones, denominadas Gualanday Inferior, Medio y Superior.

La formación Gualanday Inferior consta de capas gruesas a medias de arenitas de cuarzo de grano medio a grueso, hasta conglomeráticas. Incluye niveles de arcillolitas hacia la parte media de la unidad, que presentan una coloración rojiza y amarillenta a gris.

La formación Gualanday Medio se caracteriza por una secuencia de lodolitas abigarradas, fósiles, con alto contenido de moscovita. Hacia las partes media y superior ocurren intercalaciones de arenitas lodosas, de grano medio, en capas delgadas a gruesas, con geometría lenticular. Se considera que esta secuencia se depositó en un ambiente correspondiente a llanuras de inundación, localizadas entre ríos meandriformes y afectadas por lagunas someras, dentro de las llanuras de inundación.

La formación Gualanday Superior consta principalmente de conglomerados gruesos, clastosoportados, constituidos por cantos redondeados de cuarzo, chert, fragmentos de rocas ígneas y metamórficas de tamaño variable, con un diámetro que varía entre 10 y 15 cm dentro de una matriz de arenita gruesa. Hacia la parte superior los conglomerados son menos potentes: tienen entre 5 y 10 m de espesor; las arenitas desaparecen y las arcillolitas son escasas. En la tabla 19 se relaciona el promedio de los resultados de los análisis químicos de cinco muestras colectadas en esta formación.

Tabla 19. Composición química de las arcillas de la formación Gualanday

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	71.84	61.5	65.54
Fe_2O_3	7.13	4.48	5.89
Al_2O_3	19.55	15.42	16.94
CaO	0.84	0.07	0.35
MgO	1.12	0.28	0.81
Na_2O	0.27	0.08	0.17
K_2O	1.11	0.51	0.86
TiO_2	1.35	0.76	0.99
MnO_2	0.1	0.02	0.06
Cr_2O_3	0.06	0.01	0.02
NiO	0.15	0.01	0.05
H	2.92	0.49	1.65
Pérdida por calcinación	7.23	5.38	6.25
Total	99.98	98.8	99.59

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Dos de las muestras analizadas presentan contenidos altos de sílice, similares a los exigidos en las arcillas que se destinan a la producción de tubería de gres, pero con bajos contenidos de alúmina. La relación SiO_2/Al_2O_3 fluctúa entre 3.14 y 4.61.

De acuerdo con el análisis próximo mineralógico, las concentraciones de minerales arcillosos en esta formación están entre el 40 y 53 %, y las de cuarzo libre, entre 32 y 52 %. La abundancia de minerales arcillosos sigue la secuencia general caolinita > illita > esmectita, o caolinita > esmectita > illita. Algunos niveles muestran una concentración de caolinita del orden del 30 %, y en otros, del 18 %. En la mayoría de los análisis es evidente la presencia de clorita. El contenido de feldespatos varía entre 0.76 y 2.28 %, y de hierro expresado como hematita, entre 4.36 y 7.01 %.

Las arcillas del grupo Gualanday son aptas para ser usadas en la fabricación de tejas, tubos y ladrillos perforados, y algunas en bovedillas. Estas arcillas, según la Carta de Plasticidad de Casagrande, son de baja a mediana plasticidad.

La producción de arcillas en el departamento del Tolima corresponde a 71 139.85 toneladas, como se refleja en la tabla 20. En el informe consultado no se presentan cifras de arcillas cerámicas.

Tabla 20. Producción de arcillas en el departamento del Tolima

Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)
Ibagué	71 139.85
Ambalema	
Coello	
Guamo	
Lérida	
Rovira	
San Luis	
Valle de San Juan	

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha.
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.4. Distrito minero El Tambo-El Dovio

Este distrito comprende las zonas de actividad minera de los municipios de Bolívar, Buenaventura, Buga, Bugalagrande, Caicedonia, Cali, Candelaria, El Dovio, Guacarí, Ginebra, Jamundí, Sevilla, Yumbo y Vijes, en el departamento del Valle, y Buenos Aires, El Tambo, Puerto Tejada y Suárez, en el departamento del Cauca. De estos sitios se extraen grandes volúmenes de caliza y materiales de construcción, y en menor escala, de carbón, bentonita, magnesita y feldespato. La carretera Panamericana atraviesa de sur a norte el distrito, y de ella parten otras carreteras que comunican a todas las poblaciones de los dos departamentos (figura 13).

En este distrito se han desarrollado suelos residuales a partir de basaltos y otras rocas volcánicas, así como algunos niveles arcillosos de formaciones sedimentarias. Estas son las principales fuentes de arcillas que se utilizan en la producción de ladrillo.

Depósitos de bentonita, variedad de arcillas especiales, se han originado en esta región por la alteración de niveles de cenizas volcánicas presentes en la formación La Paila, del Neógeno Superior, localizadas en el municipio de Bugalagrande. De acuerdo con Salinas, Rodríguez, Lozano y Solano (1999), este depósito de bentonita está asociado con la provincia metalogénica Cauca-Romeral.

Hacia el occidente del Cauca y del Valle afloran basaltos y diabasas que han estado sometidos a meteorización, y como resultado de ello han originado abundantes depósitos de arcillas rojas. Estas arcillas, *in situ*, muestran poca plasticidad, pero cuando son transportadas eliminan la arena y residuos no alterados presentes en la arcilla, y adquieren carácter plástico. El color rojizo se debe a la presencia de óxidos de hierro. Se usan particularmente para elaborar artículos de cocina, terracotas artísticas y como material de construcción.

Afloran algunas arcillas de tipo coloidal, que son extraídas en El Alto de las Cruces y en Yaconal, sitios ubicados a unos 12 y 10 km al oeste de Cali, en ese orden. Cerca de Popayán, hacia el oeste, igualmente hay presencia de este material. En las márgenes del río La Vieja, en jurisdicción de los departamentos del Valle del Cauca y Quindío, existen terrazas aluviales que incluyen niveles de arcilla plástica que se utilizan en cerámicas y como material de construcción. Pereira, capital del departamento de Risaralda, se abastece de estos depósitos.

La producción de arcillas en los departamentos del Cauca y Valle del Cauca corresponde a 196 530 toneladas, como se expone en la tabla 21. La extracción de arcillas cerámicas en el departamento del Cauca alcanza las 100 083 toneladas.

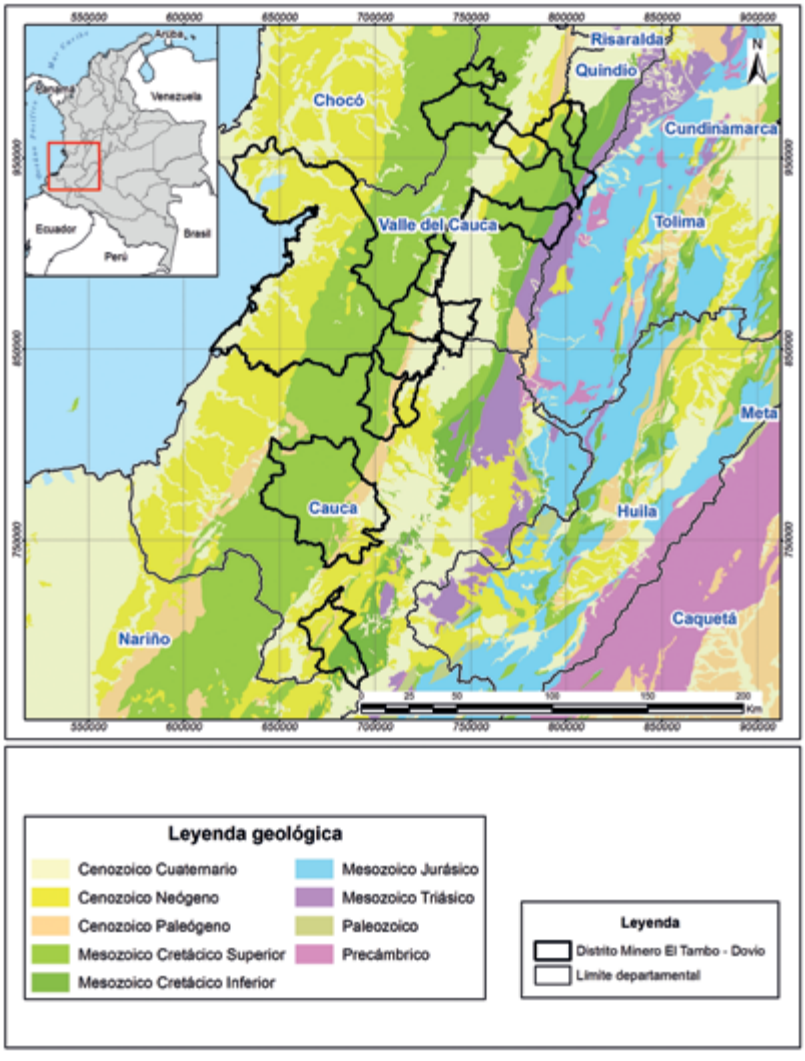

Figura 13. Distrito minero El Tambo-El Dovio
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

Tabla 21. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en los departamentos de Cauca y Valle del Cauca

Departamento	Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Cauca	Popayán	196 530	100 083
	Caloto		
	El Tambo - Cauca		
	Guachené		
	La Sierra		
	Puerto Tejada		
	Santander de Quilichao		
	Villa Rica		
Valle del Cauca	Ansermanuevo		
	Bugalagrande		
	Roldanillo		
	Zarzal		

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha.
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.4. Distrito minero Amagá-Medellín

En este distrito se incluyen las zonas mineras de los municipios de Amagá, Angelópolis, Bello, Copacabana, Fredonia, Girardota, Itagüí, Medellín, Venecia y Titiribí. Son características de este distrito las explotaciones de carbón realizadas en la zona de Amagá, y de materiales de construcción en Medellín. Su principal vía de comunicación es la carretera Central de Occidente, que va de la ciudad de Medellín a la costa atlántica. Además, la troncal del Café comunica a Medellín con Amagá y Bolombolo. El distrito cuenta con numerosas vías de penetración. En la figura 14 se muestra esquemáticamente el área del distrito.

Las arcillas de este distrito son, en general, de tipo residual, y en menor proporción de tipo sedimentario. Las arcillas de origen residual provienen de la meteorización de rocas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas, de composición intermedia a básica. El batolito Antioqueño, de edad Cretácea, es una importante fuente por intemperismo de este material. Las rocas extrusivas están datadas como del Neógeno-Cuaternario. Las arcillas así explotadas se utilizan para la elaboración de ladrillos, tubería, tejas, cerámica, locería y otros productos.

La unidad de origen sedimentario básicamente está representada por la formación Amagá, de edad Neógeno. Esta unidad se formó en un ambiente transicional marino-continental, en el que existieron corrientes trenzadas en ambientes de inundación deltaica, donde se desarrollaron lentes areníticos y capas delgadas de arcillolitas. Los niveles de arcillolitas se han interpretado más con un desarrollo propio de cuenca de inundación.

En la Formación Amagá se colectaron catorce muestras en diferentes niveles, cuyos valores máximos y mínimos se muestran en la tabla 22.

Las muestras presentan contenidos de sílice que oscilan entre 49.87 y 59.42 %, y de alúmina que fluctúan entre 12.23 y 29.67 %. Estos valores hacen que la mayoría de las muestras se ajusten al requerimiento de contenido de sílice para su utilización en alfarería común, y unas pocas por el contenido de alúmina. Se pudo determinar que solo dos muestras cumplen con los dos parámetros.

Las arcillas de la formación Amagá las clasificaron Espitia *et al.* (2003) como arcillas inorgánicas de alta, mediana y baja plasticidad, en las que la secuencia de abundancia de minerales arcillosos, según el análisis próximo mineralógico, es caolinita > esmectitas > illita > clorita, por lo cual, en general, se consideran arcillas de composición calolinítica. Estas arcillas son aptas para la producción de ladrillos macizos, tejas, tubos y ladrillos perforados. En algunos casos se requieren materiales desgrasantes para utilizarlas en la producción de ladrillos toletes.

Es importante mencionar los aportes de Maya (2003) sobre zonas antioqueñas potencialmente ricas en materiales de construcción, donde se reportan unidades geológicas que contienen arcillas estructurales en depósitos de tipo mecánico, estratificado, residual y en rocas metamórficas. Las de tipo mecánico corresponden a depósitos de ladera y coluviones asociados con el *stock* de Altavista (oriente de Medellín e Itagüí); terrazas aluviales relacionadas con el batolito Antioqueño, de composición tonalítica, y terrazas que incluyen material derivado del batolito de Farallones, de composición cuarzodiorítica (vecindad de los municipios de Andes y Betania). De acuerdo con la Carta de Plasticidad de Casagrande, estos materiales se clasifican como arcillas inorgánicas de alta, mediana y baja plasticidad.

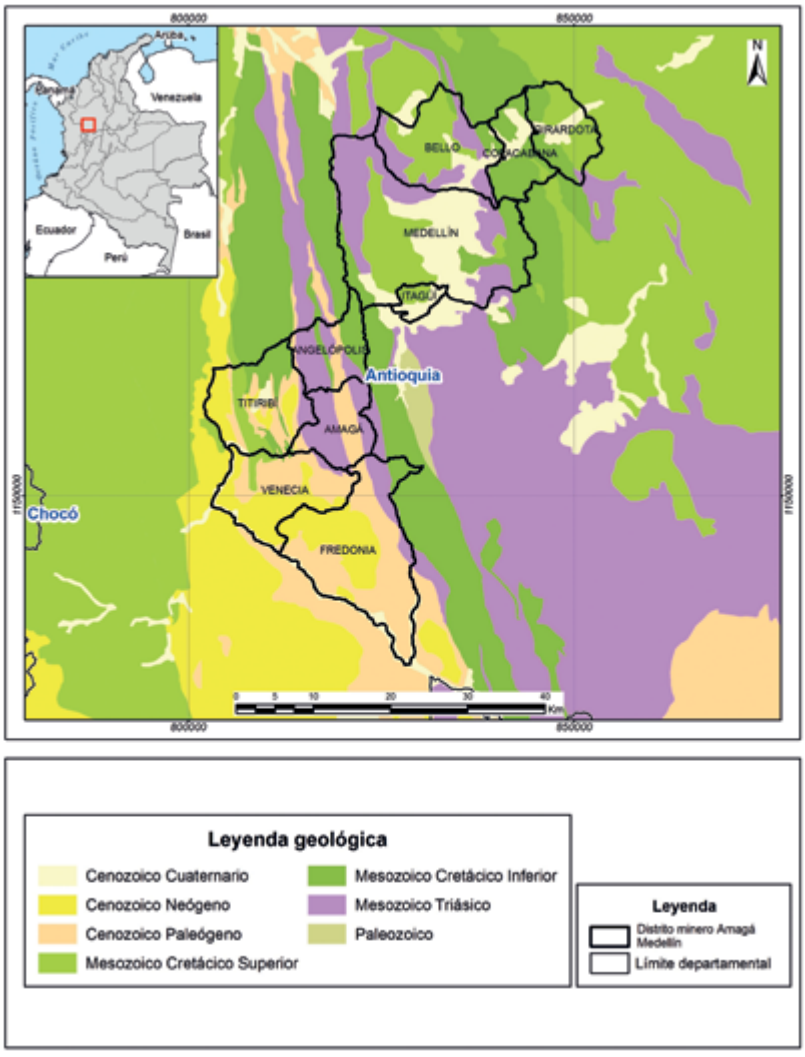

Figura 14. Distrito minero Amagá-Medellín
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

Tabla 22. Composición química de las arcillas de la formación Amagá

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	66.23	49.87	59.42
Fe_2O_3	10.42	3.65	6.09
Al_2O_3	29.67	12.23	18.51
CaO	1.44	0.03	0.36
MgO	2.15	0.65	1.19
Na_2O	1.61	0.05	0.52
K_2O	1.46	0.22	0.92
TiO_2	1.61	0.7	1.02
MnO_2	0.16	0.03	0.07
Cr_2O_3	0.03	0.01	0.01
NiO	0.03	0	0.01
H	6.32	1.17	2.87
Pérdida por calcinación	10.81	5.27	8.09
Total	99.9	98.15	99.09

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

Igualmente, las arcillas del *stock* de Altavista son aptas para la fabricación de ladrillos macizos, tejas, ladrillos para bovedillas, tubos y ladrillos perforados.

Maya (2003) menciona la formación Penderisco, que está constituida por los miembros Urrao y Nutibara. El primero potencialmente puede ofrecer material arcilloso. En la carretera Bolombolo-Ciudad Bolívar se tomaron muestreos que, sometidos a análisis de plasticidad, permiten definirlas como arcillas inorgánicas de alta plasticidad. Por otra parte, las arcillas residuales que provienen del *stock* de Altavista, sector de Itagüí, muestran ausencia de arcillas de buena plasticidad para usos en mampostería de arcilla cocida (Espitia *et al.*, 2003). Estos mismos autores colectaron trece muestras, cuyos resultados promedio se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Composición química de las arcillas del *stock* de Altavista-Itagüí, sector nororiental

Composición química	Máximo (%)	Mínimo (%)	Promedio (%)
SiO_2	62.35	41.06	47.81
Fe_2O_3	14.99	2.96	9.23
Al_2O_3	28.38	20.63	25.1
CaO	4	0.03	0.74
MgO	3.07	0.22	1.13
Na_2O	2.69	0.01	0.63
K_2O	1.21	0.01	0.45
MnO_2	0.2	0.02	0.1
Cr_2O_3	0.03	0	0.01
NiO	0.03	0.01	0.02
H	4.9	1.1	2.73
Pérdida por calcinación	12.17	5.56	9.98
Total	100.26	98.36	99.48

Fuente: Espitia *et al.* (2003)

El nivel de alúmina en esta formación corresponde con el recomendado para alfarería común, pero el nivel de sílice es bajo. Las concentraciones de los demás elementos, expresados en óxidos, registran mucha variabilidad. Algunas muestras tienen altos contenidos de calcio y magnesio.

En este sector, las muestras analizadas presentan como mineral predominante la caolinita en contenidos variables, seguido por illitas; algunas muestras son además ricas en esmécticas, y dos de ellas presentan valores de haloisita de 5.56 y 11.43 %. La mayoría de ellas tienen clorita como mineral accesorio. El contenido de minerales arcillosos fluctúa entre 60 y 75 %. Los minerales arcillosos presentes son caolinita, illita y clorita, con predominio de la primera, que contribuye a una baja contracción y a una plasticidad nula.

Por otra parte, en el mismo *stock* de Altavista en el sector de Medellín, zona noroccidental, según los resultados de los análisis químicos, hay una marcada semejanza con los obtenidos de las muestras de Itagüí. Son igualmente válidas las observaciones realizadas sobre este sector en lo que respecta a las concentraciones de sílice y alúmina. Teniendo en cuenta las concentraciones de los otros elementos y comparando los promedios en cada caso, se ve coincidencia en todos ellos; por tanto, podría tomarse la composición promedio como la representativa de este sector.

En todas las muestras analizadas, la caolinita fue el mineral arcilloso más abundante, con contenidos variables que van desde 20.7 % hasta 52 %. El orden de abundancia de los minerales arcillosos en las muestras es caolinita > illita > clorita > esmectitas. Algunos niveles evidencian mayor contenido de esmectitas que de illita y clorita, al igual que ocasionalmente se observa contenido de dickita en un 6 % y haloisita con concentraciones que fluctúan entre 4 y 7.96 %.

En el *stock* de Altavista-Medellín, zona noroccidental, se observa que algunas arcillas pueden servir para la producción de ladrillo macizo; otras, para la producción de ladrillo tolete y bloques, y algunos niveles pueden emplearse para la fabricación de tejas, tubos y ladrillos perforados. Cabe anotar que estas arcillas, después de ser sometidas a 1000 °C, presentan colores que van de amarillo naranja pálido a rojo claro.

Las sedimentitas de Sinifaná, en el sector de Guayabal, carretera Ebéjico-Santa Fe de Antioquia, incluyen niveles de arcillas que, de acuerdo con los ensayos de laboratorio y la Carta de Plasticidad de Casagrande, se clasificaron como arcillas inorgánicas de alta plasticidad (Maya, 2003). Con base en estos datos, el distrito minero Amagá-Medellín cuenta con una potencialidad de arcillas para uso en la industria cerámica de porcelanas y en la fabricación de pasta para la elaboración de ladrillos y tejas cocidas de arcilla. La mayor parte de los materiales arcillosos de este distrito se utilizan para atender la demanda de la ciudad de Medellín.

La producción de arcillas en el departamento de Antioquia corresponde a 18 098 toneladas, como se expone en la tabla 24, y la explotación de arcillas cerámicas asciende a 460 toneladas.

Tabla 24. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en el departamento de Antioquia

Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Fredonia	18 098	460
La Unión-Antioquia		
Venecia-Antioquia		

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha.
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.5. Distrito minero El Zulia

Este distrito está constituido por el área de influencia de los municipios de Cúcuta, Chinácota, Chitagá, El Zulia, Los Patios, Pamplona, Salazar, San Cayetano, Sardinata, Tibú y Villa del Rosario, localizados en el departamento de Norte de Santander. En este distrito, aparte de la arcilla, se producen carbón, caliza y roca fosfórica.

Este distrito se comunica con el interior del país por Bucaramanga, Tunja y Bogotá, mediante la troncal Central, una carretera pavimentada que permite también la comunicación con la República Bolivariana de Venezuela. Cuenta además con la troncal Central del Norte, vía que intercomunica las localidades de Pamplona, Chitagá, Málaga, Duitama y Tunja. La comunicación vial con el Atlántico se hace por la carretera que pasa por Sardinata, Ábrego, Ocaña, y desde allí con la troncal del Magdalena, a la costa atlántica. En la figura 15 se señala el área de influencia del distrito.

Los yacimientos de arcillas están asociados con secuencias sedimentarias del Terciario Superior, conocidas como grupo Guayabo y formación León, que afloran en jurisdicción de los municipios de Cúcuta, El Zulia y San Cayetano. Están constituidas principalmente por arcillolitas, arcillolitas silíceas y arenitas de cuarzo. Las arcillolitas de la formación León contienen bajas proporciones de arenitas, y su apariencia es coloidal, característica que las hace utilizables en la industria cerámica.

La producción de arcillas en el departamento de Norte de Santander corresponde a 124 866 toneladas, y la de arcillas cerámicas, a 77 552 toneladas, como se expone en la tabla 25.

Tabla 25. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en el departamento de Norte de Santander

Municipio	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Cúcuta	124 866	77 552
El Zulia		
Los Patios		
Pamplona		
San Cayetano		
Villa del Rosario		

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha.
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

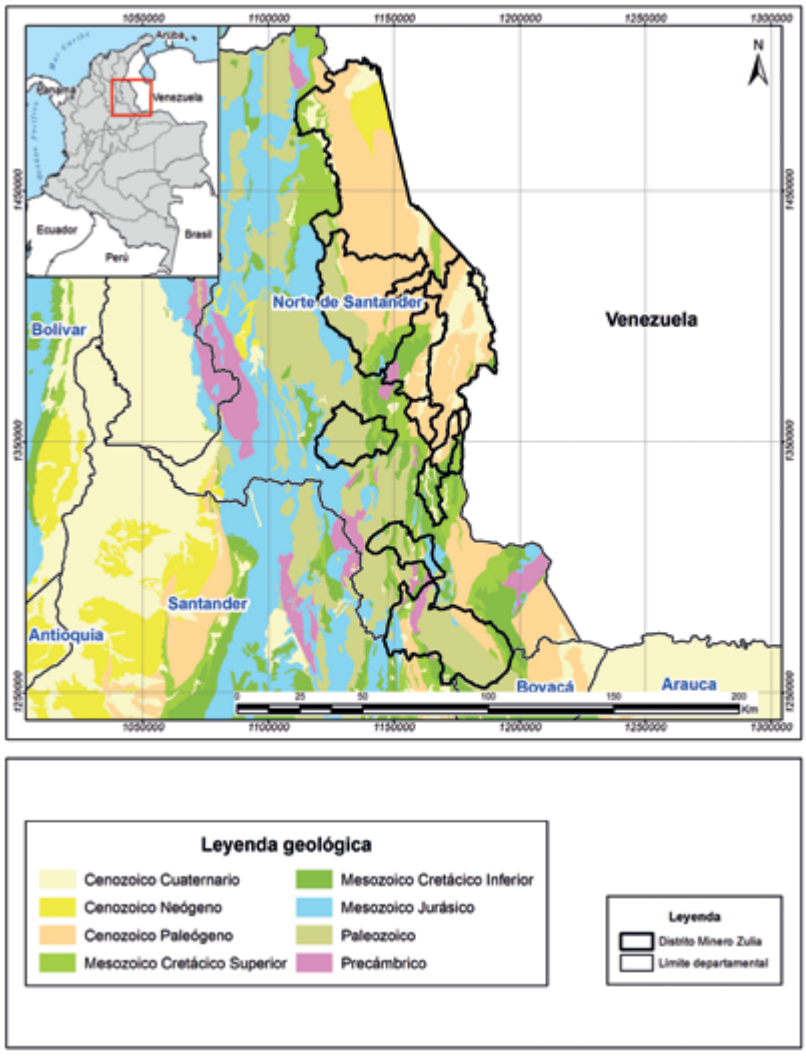

Figura 15. Distrito Minero El Zulia
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

3.2.6. Distrito minero Oriente Antioqueño

En este distrito se incluyen las zonas de actividad minera localizadas en territorio de los municipios antioqueños de La Unión, Carmen de Viboral, Rionegro y Abejorral. El distrito cuenta con diferentes vías para comunicarse con Medellín, principal centro urbano e industrial. La vía Las Palmas y la carretera Bogotá-La Dorada-Santuario-Rionegro-Medellín son las vías fundamentales. Además, cuenta con numerosas carreteras de penetración, generalmente pavimentadas y en buen estado de conservación. En la figura 16 se muestra el esquema del distrito.

En Antioquia, el depósito más importante de caolín está situado en el municipio de La Unión, y está incluido en la denominada provincia metalogénica Central (Salinas *et al.*, 1999). Dicho depósito está constituido por arcillas residuales, aunque no se descarta un origen hidrotermal asociado a la cúpula de Unión, cuerpo intrusivo satélite del batolito Antioqueño. El material extraído es sometido básicamente a un lavado y luego a una clasificación por tamaño mediante hidrociclones, para luego utilizarlo sobre todo como materia prima en la industria cerámica y de pinturas. La producción anual aproximada es de 51 000 toneladas.

Otro sitio importante de extracción es el que está ubicado en la jurisdicción del municipio de Abejorral, donde los depósitos de arcilla son principalmente de tipo transportado. La formación Abejorral, del Cretáceo, incluye niveles de *shales* silíceos (arcillolitas silíceas) y feldespáticos, que al meteorizarse originan material de color gris a blanco y de aspecto caolinítico. Esta formación se extiende hacia el departamento de Caldas, donde los niveles arcillolíticos se explotan en los municipios de San Félix y Aguadas, para la elaboración de productos cerámicos. En algunas fábricas de Medellín se utilizan para elaborar mezclas con caolines de altas especificaciones. En general, las arcillas de este distrito se emplean en los centros industriales de Medellín para la fabricación de porcelanas, cerámicas y vajillas.

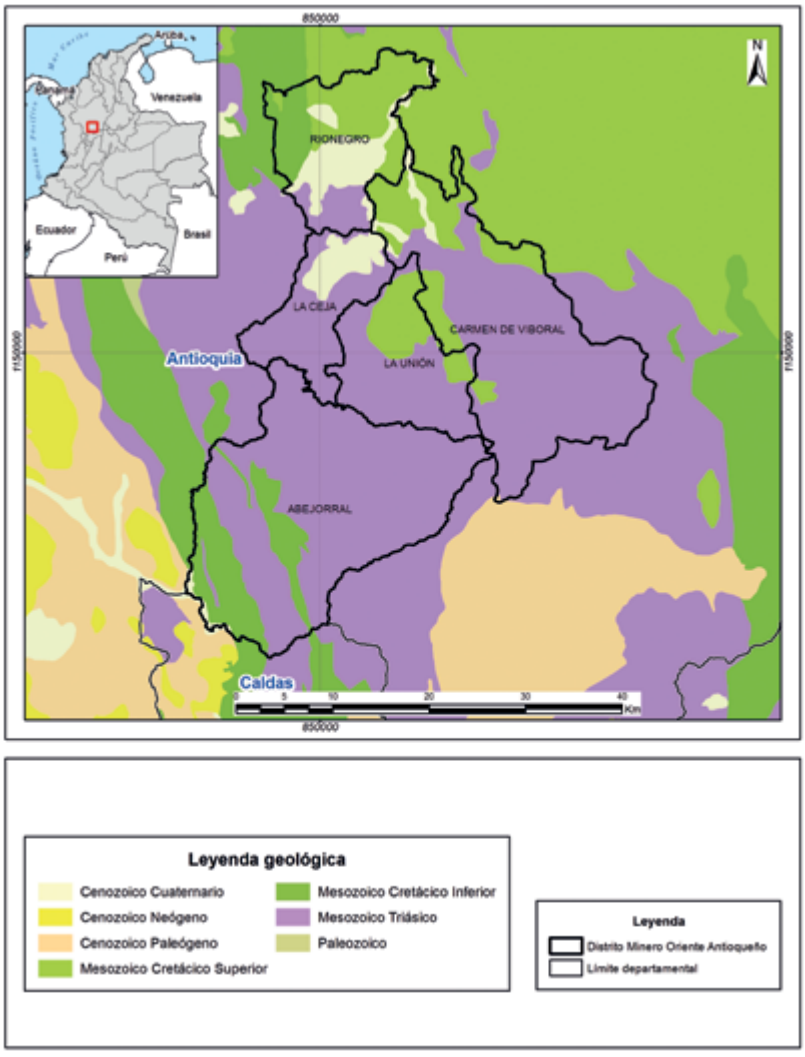

Figura 16. Distrito minero Oriente Antioqueño
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

3.2.7. Distrito minero Nordeste Antioqueño

Este distrito comprende las zonas de actividad minera localizadas en el territorio de los municipios de Amalfi, Segovia, Remedios, Anorí, San Roque, Maceo, Caucasia, El Bagre, Zaragoza, Nechí, Tarazá y Cáceres. La principal vía de comunicación de este distrito es la carretera Central de Occidente, que de la ciudad de Medellín conduce a la costa atlántica, pasando por Caucasia, Montería y Cartagena. Además, cuenta con varias carreteras de penetración que permiten la comunicación con los centros urbanos y veredales. En la figura 17 se muestra el esquema del área del distrito.

Las principales localidades que producen arcillas en este distrito son Amalfi y Segovia, donde se aprovechan yacimientos de arcillas transportadas, muy apreciadas por la industria cerámica debido a su bajo contenido de hierro.

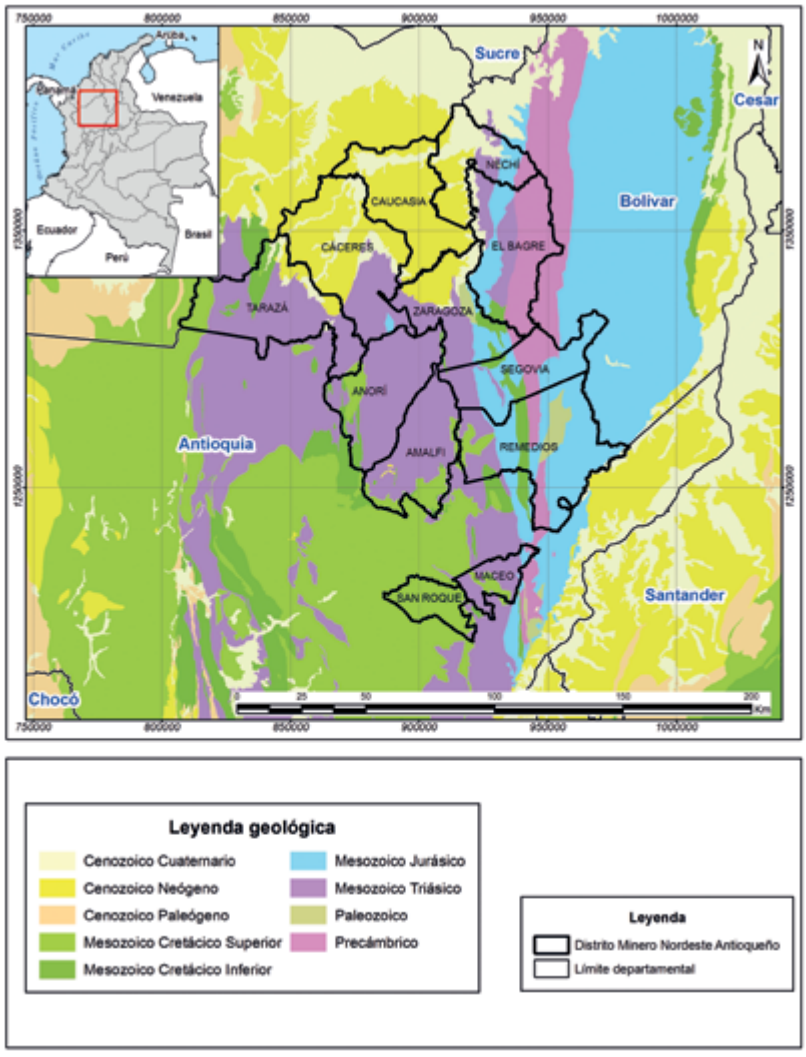

Figura 17. Distrito minero Nordeste Antioqueño
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

3.2.7. Otras áreas colombianas de interés por sus arcillas

En Colombia existen otras áreas que no están contempladas en la división de los diferentes distritos mineros y que en la actualidad surten las necesidades locales relacionadas con el desarrollo de la construcción y, en ocasiones, a pequeñas industrias artesanales.

En los alrededores de Bucaramanga, capital de Santander, se extraen arcillas a partir de suelos residuales intercalados en la meseta de Bucaramanga, asociados al Cuaternario, y en pequeños sectores como producto de la meteorización de partes expuestas del cuerpo plutónico del Jurásico, que constituye el complejo o macizo de Bucaramanga (Rodríguez, 2002). Los estratos del Jordán y Girón, considerados del Pérmico al Jurásico, incluyen niveles arcillolíticos de buena calidad. Estas arcillas se emplean básicamente en la fabricación de teja común y ladrillos.

En el departamento del Huila se encuentran yacimientos de caolín originados en la meteorización de lavas y piroclastos, que se desarrollaron especialmente en jurisdicción de los municipios de Neiva (vereda Pinares) y Palermo (vereda Upar), Yaguará (veredas de El Tigre y El Viso), Campoalegre, Tesalia y La Plata. En la parte suroccidental del departamento existen extensas capas de tobas y otros cuerpos volcánicos del Terciario y Cuaternario, donde es factible encontrar arcillas caoliníticas y bentónicas (Buitrago, 1976).

El grupo Villeta y la formación Guadalupe, datados en el Cretáceo, igualmente son fuente de caolín en los departamentos del Huila, Tolima y Cundinamarca. En el departamento de Nariño, en los sitios conocidos como Pasto, La Cruz, El Tambo, Funes, Patía, San Pablo y San Lorenzo, hay manifestaciones caoliníticas por evaluar (Arango y Ponce, 1980, en Núñez, 1987).

En Boyacá existen explotaciones entre Tunja, Paipa, Duitama y Sogamoso, donde la fuente de las arcillas son las formaciones Cumbre, del Cretáceo inferior; Guaduas, del Cretáceo superior-Paleógeno; Bogotá y Soacha, del Paleógeno, y Concentración, del Neógeno. Pequeñas explotaciones se hacen sobre los sedimentos del Tilatá y depósitos aluviales, utilizados en chircales y tejares artesanales. En la localidad de Arcabuco se extraen buenos caolines, utilizados en cerámica para pisos, sanitarios, materiales refractarios y porcelana eléctrica. En Sativanorte y Tutasá existen explotaciones a cielo abierto (Rodríguez, 2002).

Hacia el norte del departamento del Cesar se encuentran terrazas aluviales producto de ríos que provienen de la Sierra Nevada de Santa Marta, que incluyen niveles arcillosos que son aprovechados para su extracción. Por otra parte, depósitos de arcillas aluviales, asociados con los ríos Cesar y Guatapurí, se explotan artesanal e ilegalmente, y son utilizados por industrias de tipo artesanal.

Cerca de Villavicencio, en la vía al municipio de Acacías, aflora la formación Arcillas de El Limbo, de edad Paleoceno (Pulido y Gómez, 1998), y al parecer la formación San Fernando (Oligoceno-Mioceno Inferior), aprovechables para materiales de construcción.

En el departamento de La Guajira se explotan arcillas limosas de origen fluvial asociadas con el cauce del río Ranchería. Allí la producción es muy baja: cerca de 300 000 ladrillos al año. En el departamento del Magdalena, en la localidad de Ariguaní, y en Toluviejo, departamento de Sucre, se obtienen arcillas de origen aluvial tipo terraza. En los alrededores de Ciénaga y Santa Marta se aprovechan las costras producto de la meteorización de rocas ígneas de edad Terciaria y metamorfitas del Paleozoico que conforman las estribaciones occidentales de la Sierra Nevada de Santa Marta. Por último, en el departamento del Chocó existen algunas explotaciones en cercanías de la localidad de Tutunendo, sobre la carretera que comunica las ciudades de Medellín y Quibdó (Rodríguez, 2002).

En otras áreas del país, la Agencia Nacional de Minería reporta la extracción de arcillas y arcillas cerámicas en el año 2017, con valores de 255 865 toneladas y 63 130 toneladas, respectivamente (tabla 26).

Tabla 26. Producción de arcillas y arcillas cerámicas en otras áreas del país

Departamento	Producción de arcillas en 2017 (t)	Producción de arcillas cerámicas en 2017 (t)
Arauca	15 107	
Boyacá	32 115	35 957
Caldas	30 517	4030
Cesar	2657	
Córdoba	1165	
Huila	22 859	620
Meta	976	1291
Nariño	1535	4992
Quindío	3124	
Risaralda	11 327	
Santander	125 585	16 240
Sucre	8897	
Total	255 865	63 130.23

* Los datos que se presentan son preliminares, de acuerdo con la información que la Agencia Nacional de Minería ha recibido hasta la fecha
Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

En la figura 18 se presentan los principales lugares donde se extraen arcillas en Colombia. Los sitios de mayor actividad se encuentran en los departamentos de La Guajira, Cesar, Risaralda, Quindío, Huila, Meta, Santander y Norte de Santander (Ingeominas, 1994-2002). Con excepción de las bentonitas del Valle del Cauca y del Tolima, y los caolines de Antioquia, Huila, el altiplano cundiboyacense, Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Cesar, la mayoría de las arcillas del país están constituidas de arcillas comunes. En los depósitos de los departamentos ubicados en la cordillera Central, Huila, Tolima, Quindío, Risaralda, Caldas y Antioquia, algunas arcillas son de tipo esmectítico.

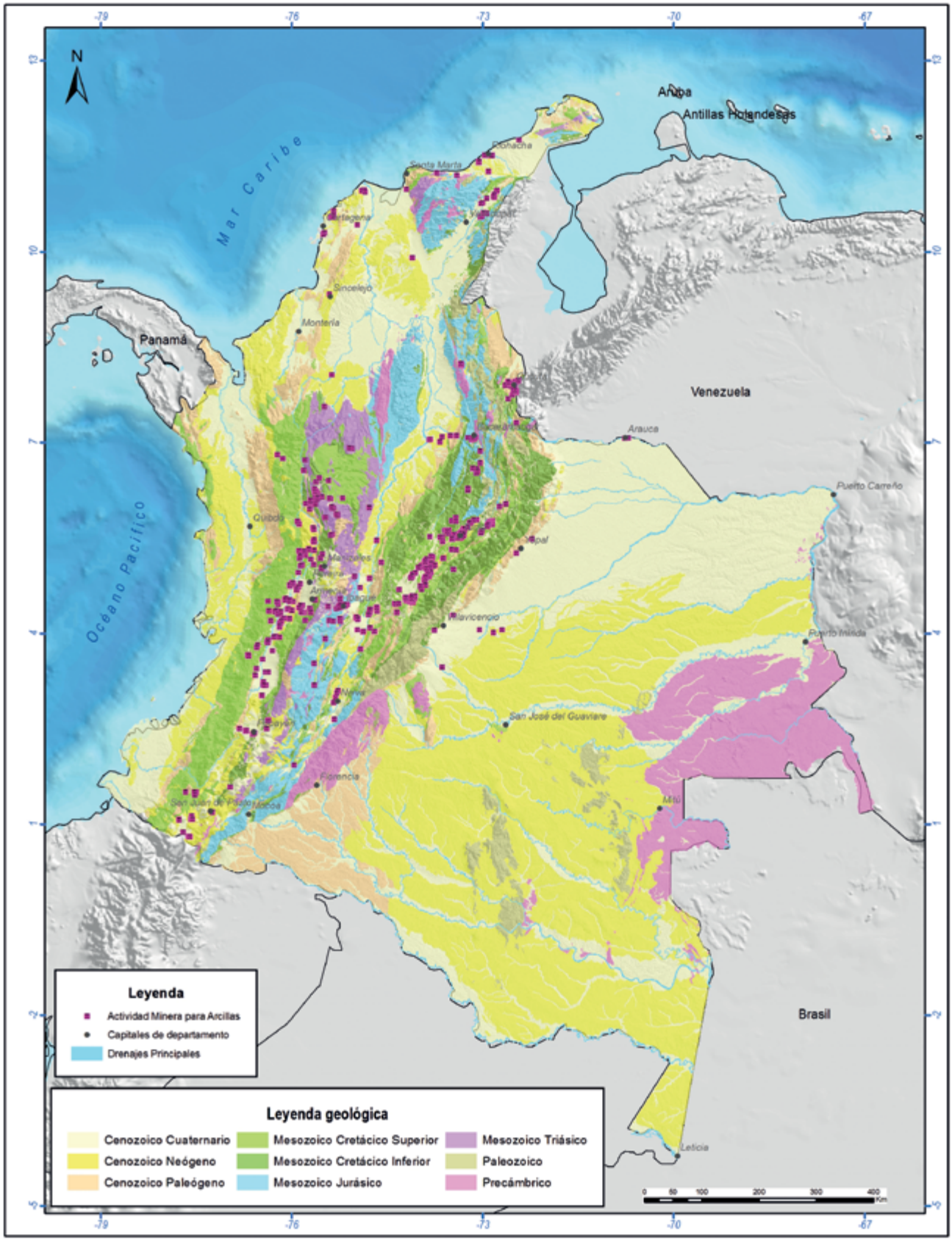

Figura 18. Principales zonas con actividad minera de arcillas en Colombia

Fuente: Ingeominas (1994-2002)

3.3. Situación actual de la minería

Actualmente, en el registro minero hay identificados 111 títulos para la exploración y extracción de arcillas en el territorio colombiano, con un total de 8454 hectáreas. Con respecto a solicitudes mineras, en las bases de datos figuran más de 1300 expedientes relacionados con materiales de construcción (arcillas, arenas-gravas y rocas ornamentales) (UPME, 2017a).

En general, los yacimientos de los diferentes distritos son explotados a cielo abierto. La labor de explotación se inicia con el descapote o limpieza de la sobrecarga del suelo, material vegetal y materiales de desecho, para así evitar la contaminación del material que se va a utilizar. El método de extracción de este tipo de material, igual que en la mayoría de la industria extractiva, consiste en trabajar frentes únicos cuyas formas geométricas son de pequeñas dimensiones. La operación de arranque se presenta como una actividad discontinua, y el volumen de material extraído depende fundamentalmente de las características y capacidades de las plantas de transformación. Los frentes de explotación que mueven bajos volúmenes de material removido son discontinuos en su extracción, y generalmente no presentan planes adecuados de explotación.

Como complemento de estos conceptos, es importante comentar algunas dificultades propias de la minería en sus etapas de explotación, que hay que evaluar. Ingeominas (2002) propone unos indicadores como herramienta de evaluación de la afectación que sobre la estabilidad de los materiales geológicos superficiales del terreno causa la explotación de arcillas a cielo abierto, para lo cual se recurre a la identificación y caracterización de indicadores de relieve, litología, procesos superficiales, vulnerabilidad a la erosión del terreno y nivel tecnológico de la actividad minera. Estos indicadores se agrupan en un índice global de estabilidad del terreno y se aplican a las formaciones superficiales, además de que pretenden constituirse en una base útil de información geoambiental para la toma de decisiones sobre políticas de gestión ambiental en el sector minero y para la formulación de estrategias adecuadas de planificación de uso del territorio.

Como conclusión, se puede establecer que los trabajos de extracción de materiales de construcción se concentran en la periferia de las ciudades capitales, y que el mercado de la construcción se abastece con agregados pétreos y productos de arcilla para producir ladrillos, tejas, pisos y tubos de gres. Como se ha anotado, depósitos de caolín y caolinita son importantes en el país, sobre todo los ubicados en las cordilleras Central y Oriental. Entre estos merecen especial mención las lutitas caoliníticas, asociadas al Cretáceo y pertenecientes a las formaciones Villeta y Guadalupe, que son fuente de caolín en los departamentos de Cundinamarca, Huila y Tolima. Caolines originados a partir de la meteorización de actividad volcánica, principalmente lavas, piroclastos, cenizas y tobas, se encuentran en los departamentos de Huila, Cauca y Nariño.

Depósitos de caolines asociados a rocas plutónicas se han localizado en los departamentos de Tolima y Antioquia. En el Tolima, los yacimientos se forman a partir de la meteorización de rocas de composición cuarzo-granodiorítica del batolito de Ibagué. En Antioquia se encuentran yacimientos de caolín asociados al batolito Antioqueño y al *stock* de Altavista, especialmente en los municipios de Yarumal, Medellín, Santuario, Carmen de Viboral, Cocorná, Marinilla y La Unión. Además, se pueden mencionar otros sitios en Colombia potencialmente generadores de caolín, como la Sierra Nevada de Santa Marta (entre Ciénaga y Sevilla), Nariño (en los municipios de Patía, San Pablo, La Cruz, San Lorenzo, Pasto y Tambo), Boyacá (Santa Rosa, Duitama, Paipa y Tuta) y la sabana de Bogotá, donde se ha determinado la existencia de algunas arcillas especiales, entre las que se destacan las arcillas plásticas de las formaciones Bogotá y Usme, localizadas entre las carreteras Bogotá-Fusagasugá y Guatavita-Guasca, que se emplean en la fabricación de porcelana sanitaria (Rodríguez, 1987).

En el departamento del Cauca se reportan arcillas plásticas de buenas características cerámicas, cuya explotación deja 300 000 toneladas en la localidad de Chozas, y 900 000 toneladas en Calicanto. En las localidades de San Pedro y Santa Rosa se reportan caolines útiles para productos cerámicos, aunque sus reservas son pequeñas (Acevedo, Cardozo y Rodríguez, 1986).

En lo que respecta a las bentonitas, en Colombia la producción de estas arcillas es relativamente baja. En la Planta de Bentonitas de Colombia (Bentocol), localizada en el municipio de Bugalagrande (Valle del Cauca), esta arcilla se procesa para ofrecer una línea de producción que abarca bentonitas sódicas y cálcicas naturales, al igual que arcillas coloidales. Este material, después de procesado, se utiliza en diferentes aplicaciones de la industria, como alimentos concentrados para animales, metalurgia, lodos para perforación, jabones, obturación de fugas, aditivo para morteros y barreras de suelos de bentonita, y también en productos refractarios y cerámicos.

3.3.1. Potencial

Colombia cuenta con una gran variedad de unidades geológicas, de diferentes edades, que se distribuyen a lo largo y ancho del país. En estas unidades de roca se dan secuen-

cias sedimentarias con importantes niveles limolíticos y arcillolíticos que no se han evaluado ni caracterizado con fines de aprovechamiento en industrias cerámicas, pero cuyo potencial es alto. Se podría decir que más del 60 % de la cordillera Oriental está constituida por sedimentitas, entre las que se destacan formaciones como el Devónico Floresta (Devoniana), Cuche (Carboniano) y algunos niveles lutíticos del Jordán y Girón, del Jurásico. Están también las lutitas de Macanal, Fómeque, Chipaque, Umir y Catatumbo, del Cretáceo, formaciones terciarias como Guaduas, Soacha, Arcillas del Limbo (Los Cuervos), San Fernando, Carbonera, Concentración, León y Guayabo, Gualanday, Seca y sus equivalentes en otras regiones, que dejan en claro el gran potencial que, solo en la cordillera Oriental, tiene el país.

En la cordillera Central, los grandes batolitos, *stocks* y secuencias metamórficas son fuentes muy importantes de depósitos residuales, generalmente caoliníticos y algunos esmectíticos. Las secuencias sedimentarias terciarias, como la formación Amagá, constituyen otro potencial para la obtención de arcillas. La meteorización de los basaltos y diabasas de la cordillera Occidental origina los principales depósitos de arcillas residuales. En esta región afloran igualmente sedimentitas terciarias con notables niveles de arcillolitas, como las formaciones Guachinte, Ferreira y Esmita.

En la actualidad, gran parte de este potencial abastece las necesidades del sector de materiales de construcción y de la industria cerámica, alfarería, terracotas artísticas y otros usos específicos.

3.3.2. Comercio

La industria de las arcillas en Colombia ha venido incrementando tanto su producción como su desarrollo tecnológico para responder al gran auge de la construcción en los principales centros urbanos del país y a la utilización de los diferentes productos. La demanda de arcillas supera la oferta nacional, y aunque Bogotá es líder en su producción, Antioquia posee reservas que deberían explotar empresas del orden nacional con la capacidad económica para invertir en la explotación de este mineral, y no solo para satisfacer la demanda local, sino la nacional, con miras a fortalecer un mercado internacional. A pesar del potencial de los recursos que posee Colombia, en particular de arcillas de tipo común, en cuanto a arcillas especiales la industria importa caolín, bentonita, tierras de batán y arcillas refractarias en pequeños volúmenes para suplir la falta de oferta que hay en el país. En la tabla 27 se muestra la producción colombiana, diferenciando arcillas comunes y caolines.

Tabla 27. Producción de arcillas en Colombia, 2013-2017

Año	Tipo de arcillas	Mineral	Volumen (t)	Volumen total (t)
2013	Arcillas industriales	Arcillas bentónicas	9 056.00	60 474.00
		Arcillas caoliníticas	51 168.00	
		Arcillas refractarias	250	
	Arcillas comunes	Arcillas cerámicas	1 533 321.00	3 690 893.00
		Arcillas ferruginosas	70 784.00	
		Arcillas misceláneas	2 086 788.00	
2015	Arcillas comunes	Arcillas cerámicas	2 288 030.40	4 634 422.36
		Arcillas ferruginosas	4 854.00	
		Arcillas misceláneas	2 321 255.92	
		Arcillas caoliníticas	20 282.04	
2016	Arcillas industriales	Arcillas bentónicas	—	300
		Arcillas refractarias	300	
	Arcillas comunes	Arcillas caoliníticas	8 509.64	3 437 378.21
		Arcillas cerámicas	1 687 747.80	
		Arcillas ferruginosas	7 030.00	
		Arcillas misceláneas	1 734 090.77	
2017	Arcillas industriales	Arcillas	1 471 302.39	1 471 302.39
		Arcillas bentónicas	ND	
		Arcillas Refractarias	ND	
	Arcillas comunes	Arcillas caoliníticas	ND	699 644.24
		Arcillas cerámicas	699 644.24	
		Arcillas ferruginosas	ND	
		Arcillas misceláneas	ND	

ND: no se tiene información de producción hasta la fecha
Fuente: UPME (2017b), Agencia Nacional de Minería (2018)

Como se observa, la producción de arcillas se ha mantenido constante en los últimos años en un volumen que oscila entre 3.5 a 4.5 millones de toneladas.

En cuanto a las exportaciones, han tenido un descenso constante desde el año 2012, en especial en las arcillas especiales tipo caolín. Esto se debe a la demanda nacional, que consume la mayoría de la producción propia. En la figura 19 se observa el comportamiento de las exportaciones de las arcillas en el periodo 2010-2016.

Los precios definidos por la UPME para obtener la base de liquidación de regalías correspondientes al año 2016 se muestran en la tabla 28.

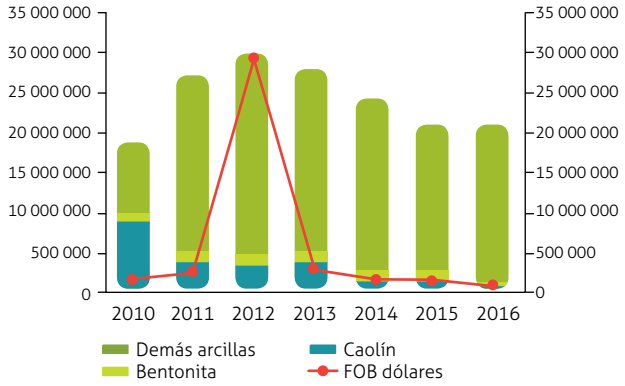

Figura 19. Exportaciones de arcillas en el periodo 2010-2016 (cifras en kg)
Fuente: UPME (2017c)

Tabla 28. Precios base para la liquidación de regalías correspondientes al año 2016

Grupo	Mineral	Unidad	Precio en la boca de mina
Arcillas industriales	Arcillas bentónicas	Tonelada	16 676.44
	Arcillas refractarias	Tonelada	22 276.74
Arcillas comunes	Arcilla común	Tonelada	16 172.13
	Arcillas ferruginosas	Tonelada	16 692.63
	Arcillas misceláneas	Tonelada	16 692.63
	Arcillas caoliníticas	Tonelada	10 642.33

Fuente: UPME (2016)

3.3.3. Perspectivas

En Colombia, las perspectivas de desarrollo y crecimiento de la industria de la arcilla son optimistas. Aunque las exportaciones han disminuido, en los últimos años hay un incremento en la solicitud de títulos mineros y autorizaciones temporales, gracias a la inversión en infraestructura que viene desarrollando el Gobierno.

De acuerdo con la ANM, según cita en SGC (2017), los materiales de construcción utilizados en los proyectos de infraestructura desarrollados en el país, en un alto porcentaje se obtienen a partir de las autorizaciones temporales. De los 734 títulos mineros otorgados para la explotación de materiales de construcción, 373 corresponden a autorizaciones temporales otorgadas a los concesionarios de obras de infraestructura vial. El material de construcción obtenido de las áreas otorgadas por la autoridad minera a particulares bajo la modalidad de contratos de concesión es utilizado en actividades de construcción y de infraestructura.

Asimismo, en los años 2013 y 2014 la UPME realizó estudios sobre la situación actual en diferentes ciudades capitales, cuyos resultados se resumen a continuación:

De acuerdo con las proyecciones de oferta y demanda realizadas en el estudio, las ciudades de Cali, Cúcuta, Villavicencio, Cartagena, Sincelejo, Yopal, Valledupar y Montería tienen capacidad para abastecer su propia demanda de materiales de construcción hasta el año 2024. De igual manera, se identificó que el 48 % de las minas que proveen los materiales de construcción en estas ocho ciudades son de origen aluvial, y un 52 % corresponden a canteras (SGC, 2017)

Asimismo, al hacer una comparación entre las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y las del eje cafetero, los resultados evidenciaron que Bogotá es la ciudad más afectada, en sus vecindades, por las restricciones que impiden el aprovechamiento de materiales de construcción, lo cual hace que las fuentes resulten más distantes, lo que se traduce en un incremento de los costos de construcción, razón por la cual es necesario identificar zonas cercanas potencialmente explotables que puedan dar respuesta a la demanda local. A la fecha, se ha reconocido que zonas vecinas al distrito capital, como Guateque y Carmen de Carupa, tienen potencialidad. A corto y mediano plazo, la construcción de obras de infraestructura vial permitirá el acceso a fuentes muy importantes de materiales, tales como la de La Dorada, que podrán reemplazar a Subachoque en la oferta de materiales de construcción (SGC, 2017).

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Desde el punto de vista del medio ambiente, la industria de la arcilla tiene características generales muy similares a la de las arenas y gravas, y las normativas, tanto del Ministerio de Minas y Energía como las del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y del de Vivienda, Ciudad y Territorio, prácticamente son las mismas. Como política preventiva y paliativa se propone que las empresas, tanto en la actividad de extracción como en la industrial, traten de adoptar la cultura fundamentada en que, así como la naturaleza permite el aprovechamiento de sus recursos, de la mejor manera posible hay que restituirle su forma paisajística inicial y reponer las fuentes de agua, con el fin de evitar una erosión anticipada y de garantizar que se desarrollen nuevos suelos y nueva vegetación.

Arcillolita ferruginosa conchífera

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Fotografía: Jair Ramírez, SGC

Bibliografía

Acevedo, A., Cardozo, P. y Rodríguez, P. (1986). *Exploración y evaluación de los yacimientos de arcillas, caolines, feldespatos y cuarzos en el departamento del Cauca*. Informe 2057. Bogotá: Ingeominas.

Agencia Nacional de Minería (2018). *Así se movieron las cifras de producción de minerales en 2017*. Disponible en https://www.anm.gov.co/?q=asi-se-movieron-las-cifras-de-produccion-de-minerales-en-2017

Andrade, L., Covelo, E. y Vega, F. (2005). *Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales*. Disponible en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642005000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Consultado el 9 de agosto de 2017.

Artigas, D. (2004). *Composición del suelo*. Montevideo: Universidad de la República.

Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J. y Quintero, J. (2003). *Análisis próximo de arcillas para cerámica*. Bogotá: Ingeominas.

British Geological Survey. (2017). Disponible en http://bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldstatistics.html

Bradanovic, T. (2007). *Arcillas y bentonitas*. Chile: Hermes Ltda.

Buitrago, C. (1976). *Ocurrencias minerales en el departamento del Huila*. Informe técnico. Ibagué: Ingeominas.

Camacho, G. y Celada, A. (2004). *Definición de zonas potenciales para esmectitas en los departamentos del Valle, Tolima y Caldas*. Bogotá: Ingeominas.

Corrales, I., Rosell, J., Sánchez de la Torre, L., Vera, T. y Vilas, M. (1977). *Estratigrafía*. Madrid: Rueda.

Daza, C., Moreno, S. y Molina, R. (2004). Bentonita colombiana modificada con Al-Cu, para la oxidación de fenol en medio acuoso diluido. *Scientia et Tecnica*, 265-270.

Domínguez, J. y Schifter, I. (1995). *Las arcillas: el barro noble*. Disponible en http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/arcillas.html.

Espitia, C., Quintero, J., Rodríguez, A., Bernal, F., Romero, F., Mojica, J., *et al*. (2003). *Catálogo de propiedades físicas para cerámica roja en los alrededores de Medellín, Ibagué y Bogotá*. Bogotá: Ingeominas.

García, E. y Suárez, M. (2003). *Las arcillas, propiedades y usos*. Madrid: Universidad Complutense.

Grim, R. (1953). *Clay Mineralogy*. Illinois: McGraw- Hill.

Hauser, E. (1955). The Colloid Science of Silica and Silicones. *Clays and Clay Minerals*, 4(1), 45-53.

IGME (2014). Arcilla. En *Panorama minero*. Disponible en http://www.igme.es/panoramaminero/actual/ARCILLA_14.pdf

Ingeominas (1994-2002). *Inventario minero, geológico y ambiental*. Bogotá: Ingeominas.

Ingeominas (2001). *Inventario minero nacional*. Bogotá: Ingeominas.

Ingeominas (2002). *Evaluación de efectos potenciales (sensibilidad geoambiental) por aprovechamiento de recursos del subsuelo*. Plancha 5-09. Bogotá: Ingeominas.

Ingeominas (2006). *Mapa geológico colombiano escala 1:2 800 000*. Bogotá: Ingeominas.

Jiménez, J. y de Justo, J. (1975). *Geotécnica y cimientos II: propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Rueda.

Julivert, M. (1961). Observaciones sobre el Cuaternario de la sabana de Bogotá. *Boletín Geológico*, 7, 5-36.

Madrid, U. P. (2012). Filosilicatos. En *Manual de mineralogía y petrología*. *Guía interactiva de minerales y rocas*. Disponible en http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/page.php?q=5e4e6af6cd9

Marquínez, G., Rodríguez, Y. y Fuquen, J. (2002). *Mapa geológico de Colombia, plancha 365 - Coconuco, escala 1:100.000*. Memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas.

Maya, M. (2003). *Zonas potenciales para materiales de construcción en los alrededores de Medellín. Colombia. Planchas 130, 146 y 166, escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.

Meléndez, B. y Fuster, J. (2003). *Geología*. Madrid: Thomson.

Meunier, A. (2005). *Clays*. Francia: Springer.

Monsalve, M. (2000). *Formación Coconucos. Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Núñez, A. (1987). *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Picasso, G. y Sun, M. (2008). Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74(1), 57-74.

Pla Ortiz de Urbina, F. y Herrera, H. (2002). *Laboreo minero. Curso de laboreo I*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Pulido, O., Gómez, L., y Marín, P. (1998). *Geología de la Plancha 266 —Villavicencio. Mapa a escala 1:100.000*. Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, A. (1998). *Las arcillas: aportes a su conocimiento, evaluación y caracterización físico cerámica*. Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, A. (1987). *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, A. (2002). *Mapa de minerales industriales, zonas potenciales para materiales de construcción*. Bogotá: Ingeominas.

Romero, G. y Barros, S. (2004). *Las arcillas: propiedades y usos. Yacimientos minerales*. Madrid: Universidad de Salamanca.

Salinas, R., Rodríguez, C., Lozano, H. y Solano, F. (1999). *Mapa metalogénico de Colombia. Informe 2259*. Bogotá: Ingeominas.

SGC (2017). Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los materiales de construcción. En *Estrategias para el fortalecimiento del sector de la construcción en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Statista (2017a). *Average price of common clay from 2007 to 2017 (in U. S. dollars per ton)*. Disponible en https://www.statista.com/statistics/248190/average-price-of-common-clay/.

Statista (2017b). *Average bentonite price in the U. S. from 2007 to 2017 (in U. S. dollars per ton)*. Disponible en https://www.statista.com/statistics/248186/average-bentonite-price/.

Statista (2017c). *Average price of kaolin in the U. S. from 2007 to 2017 (in U. S. dollars per ton)*. Disponible en https://www.statista.com/statistics/248194/average-price-of-kaolin/.

Thorez, J. (2005). *Practical XRD analysis of clay minerals*. Bélgica: Universite de Liege.

Torres, M., Monsalve, M., Pulgarín, B. y Cepeda, H., (1999). Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). *Boletín Geológico* 37(1-3): 1-51.

UPME (2005). *Distritos mineros, exportaciones e infraestructura de transporte*. Bogotá.

UPME (2016). *Resolución 184 de 2016 del 30 marzo de 2016*. Bogotá.

UPME (2017a). *Catastro minero. Informe Interno*. Bogotá.

UPME (2017b). *Informe de producción anual de minerales industriales. Informe interno*. Bogotá.

UPME (2017c). *Sistema de información minero colombiano*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Paginas/default.aspx

Vallejo, J. (2014). Los minerales. En *Manual de geología*. Disponible en http://www.bdigital.unal.edu.co/48418/19/losminerales.pdf