





RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

VOL. 1

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

vol. 1

Ministerio de Minas y Energía

María Fernanda Suárez Londoño
Ministra de Minas y Energía

Carolina Rojas Hayes
Viceministra de Minas

Diego Mesa Puyo
Viceministro de Energía

Servicio Geológico Colombiano

Oscar Eladio Paredes Zapata
Director general

Gloria Prieto Rincón
Directora de Recursos Minerales

© Servicio Geológico Colombiano

ISBN impreso obra completa: 978-958-52469-3-5
ISBN digital obra completa: 978-958-52469-6-6
ISBN impreso vol. 1: 978-958-52469-4-2
ISBN digital vol. 1: 978-958-52469-7-3

Compiladoras

Gloria Prieto Rincón
Clara Liliana Guatame Aponte
Sara Catalina Cárdenas

Autores de capítulos

Javier Eduardo Becerra
Rodolfo Gilart González
Humberto González
René F. Lugo Primelles
Adrián Pérez Ávila
Orlando Pulido González
Noel A. Téllez Irreño
Seiry Soleny Vargas
Francisco J. Zambrano Ortiz

Colaboradores

Silvia Álvarez
Luis Enrique Bernal Vargas
Sara Catalina Cárdenas
Leopoldo González Oviedo
Clara Liliana Guatame Aponte
Diana Jiménez
Jaime Mojica
Diana María Montoya Arenas
Raúl Muñoz
Alberto Núñez
Gabriel Rodríguez García
Gabriel Salazar
Rosalba Salinas
Ricardo Viana

Comité Editorial SGC
Diagonal 53 n.º 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

Presidente

Virgilio Amaris Ibañez

Integrantes

Mario Andrés Cuéllar
Gloria Prieto Rincón
Marta Calvache Velasco
Hernán Olaya Dávila
Humberto Andrés Fuenzalida
Margarita Bravo Guerrero
Teresa Duque
Viviana Dionicio
Julián Escallón
Armando Espinosa
Juan Guillermo Ramírez
Manuel Hernando Romero

Fotografías de carátula
Alejandra Cardona, SGC

Edición y diagramación
Carolina Hernández, Edición general
Édgar Ordóñez, Corrección de estilo
Diana Abadía Zapata, Diseño
Leonardo Cuéllar, Diagramación

Impresión
Imprenta Nacional de Colombia
Carrera 66 n.º 24-09
pbx: 457 8000
www.imprenta.gov.co
Bogotá, D. C., Colombia

Octubre, 2019

Publicaciones Geológicas Especiales n.° 40

Citación: Prieto R., G., Guatame, C. L. y Cárdenas, S. C. (comps). (2019). *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

RECURSOS MINERALES DE COLOMBIA

vol. 1

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

El futuro es de todos

Minenergía

CONTENIDO

Prólogo 7

1. Materiales de construcción

Arenas y gravas 11
Arcillas 47
Rocas ornamentales 95

2. Minerales energéticos

Uranio 129

3. Minerales de interés

Arsénico 161
Asbesto 179
Barita 193
Granate 213

PRÓLOGO

El Servicio Geológico Colombiano, entidad de ciencia y tecnología adscrita al Ministerio de Minas y Energía, desde hace algunos años viene adelantando la labor de actualizar la información sobre recursos minerales de Colombia, razón por la cual ha elaborado publicaciones dedicadas a minerales o a grupos de minerales específicos, tales como el carbón y las calizas, sobre los cuales se han entregado reportes que ya han sido divulgados. En esta ocasión, como producto del trabajo de varios años de profesionales con estudios y experiencia en diversas disciplinas, la Dirección de Recursos Minerales hace entrega de dos volúmenes en los que se presentan otros minerales de interés que se encuentran en el territorio colombiano.

El subsuelo colombiano posee diversos recursos minerales, que la naturaleza generosamente ha otorgado a este territorio, como resultado de procesos endógenos y exógenos, de naturaleza geológica, geoquímica, geofísica y metalogénica, que unidos a las cambiantes condiciones climáticas ocurridas a lo largo de millones de años, han modelado la fisiografía y los depósitos minerales existentes actualmente en Colombia.

En cada capítulo de los dos volúmenes entregados se describe la naturaleza y el origen de cada mineral, sus características, usos, ambiente geológico de formación, principales tipos de depósitos y métodos de aprovechamiento. Seguidamente se hace referencia a su existencia en Colombia, sus principales yacimientos y depósitos, y finalmente se presentan generalidades de su mercado a nivel global. En algunos casos específicos, y por su naturaleza mineral, se presentan consideraciones ambientales sobre su manejo.

El primer volumen contiene un capítulo inicial dedicado a materiales de construcción, e incluye arenas y gravas, arcillas y rocas ornamentales. El segundo capítulo corresponde a minerales energéticos, específicamente uranio, y el tercer capítulo está dedicado a minerales de interés por su incidencia en la salud, o por su uso industrial, y en entre ellos se incluyen el arsénico, el asbesto, la barita y el granate.

El segundo volumen comprende un cuarto capítulo que compendia los metales y piedras preciosas, tales como oro, plata, diamante y esmeralda. Finalmente, en el capítulo quinto se presentan los metales de la industria del acero: hierro, cromo y cobalto.

Es responsabilidad del Servicio Geológico Colombiano actualizar periódicamente las publicaciones sobre recursos minerales de Colombia, para así cumplir con el compromiso de divulgar y asegurar la apropiación social del nuevo conocimiento que van adquiriendo la institución y el país en esta materia, que es de interés nacional y es de vital importancia para proyectar el desarrollo económico, social y ambiental de la nación.

Gloria Prieto Rincón
Directora de Recursos Minerales

Oscar Eladio Paredes Zapata
Director general

1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Arenas y gravas

Orlando Pulido González

Arcillas

Orlando Pulido González

Rocas ornamentales

Javier Eduardo Becerra / Orlando Pulido González



11. Arenas y gravas



47. Arcillas



95. Rocas ornamentales



Arenas. Puerto Salgar, Cundinamarca
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Arenas y gravas

Orlando Pulido González

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

Las arenas y gravas deben considerarse recursos fundamentales para el desarrollo socioeconómico de la comunidad, puesto que son indispensables para la construcción de vivienda y de vías de comunicación, así como en la evolución arquitectónica de ciudades, poblados y veredas.

La minería extractiva debe hacerse lo más cerca posible de los centros de consumo, para que su fase comercial sea más viable. El valor del producto no es muy alto, pero si esta actividad se lleva a cabo en sitios alejados, el costo del transporte incrementa sustancialmente su valor comercial. En este tipo de minería hay que tomar en cuenta las disposiciones normativas referentes al tema ambiental, para que su desarrollo sea armónico con la naturaleza.

Los estudios disponibles relacionados con los materiales de construcción, específicamente con las arenas y gravas, se asocian con el estudio regional de las unidades estratigráficas para definir la potencialidad del producto. Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC), desde la década de los noventa, ha efectuado algunas exploraciones en este sentido.

Como se mencionó en la anterior versión de *Recursos minerales de Colombia* (1987), las arenas y las gravas corresponden a sedimentos naturales en los que el diámetro de los granos de arena va desde 0.0625 hasta 2 mm, y el de las gravas, desde los 2 hasta los 256 mm.

Los depósitos cuaternarios están constituidos por fragmentos de rocas sedimentarias, ígneas, metamórficas y diferentes minerales, lo cual les da características particulares. Con base en tales características se dice que las arenas industriales deben ser silíceas (SiO_2), esto es, deben estar constituidas casi en su totalidad por lo que comúnmente se conoce como *cuarzo*, o algunas de sus variedades; sin embargo, es normal encontrar fragmentos de rocas silíceas, porcentajes relativamente bajos de feldespatos, micas, óxidos de hierro y algunos minerales pesados.

Para ilustrar el tamaño límite de los granos y dar a conocer la terminología con que se designan las arenas y gravas, más adelante se presentará la clasificación textural, que es la más usual en los libros y trabajos de petrología sedimentaria (tabla 1).

Con respecto a las gravas, se reporta la siguiente clasificación, según el tamaño requerido en los procesos industriales (González, Cárdenas y Parrado, 2001).

Tabla 1. Tamaño del grano y clasificación textural de arenas y gravas

Grupo	Diámetro (mm)	Clase	Sedimento y tamaño textural (agregado no consolidado)			Compactada (agregado consolidado)
Rocas detríticas	256	Ruditas	Bloques	Guijón	Grava	Conglomerados, si son redondeados, o brechas, si son angulosos
	16		Cantos	Guijarro		
	4			Gránulo		
	2	Arenas	Arena muy gruesa			Arenitas
	1		Arena gruesa			
	0.05		Arena media			
	0.25		Arena fina			
	0.125		Arena muy fina			
	0.062					

Fuente: Corrales, Rosell, Sánchez de la Torre, Vera y Vilas (1977)

Gruesa o común: son aquellas gravas que pueden pasar un tamiz de 1.5 pulgadas (38.1 mm) y ser retenidas por un tamiz de $^{3}/_{8}$ de pulgada (9.5 mm); es decir, un material que puede variar entre 38 y 10 mm, aproximadamente.

Fina: corresponde a gravas que pasan un tamiz de $^{1}/_{2}$ pulgada (12.7 mm) y son retenidas por un tamiz de $^{1}/_{4}$ de pulgada (6.4 mm).

Mixta: es la mezcla de las dos anteriores, con el fin de lograr usos específicos.

Se emplea el término *agregado pétreo estructural* para referirse a todos aquellos áridos o materiales provenientes de rocas que pueden usarse en su estado natural, o después de un proceso mecánico de trituración o fragmentación, lavado y clasificado por tamaño, empleados en la industria de la construcción, como gravas, arenas, triturados y agregados para concretos (Langer y Glanzman, 1993; Rodríguez, 2002).

Las arenas naturales son arenas no consolidadas, término que se emplea por lo regular con independencia de la composición mineralógica. Generalmente están constituidas por cuarzo, fragmentos de roca, micas y otros minerales secundarios. El término *arena silícea* informa que la arena está constituida básicamente por sílice (SiO_2).

De acuerdo con su procedencia y con los procesos de obtención, los áridos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Áridos naturales.** Son aquellos provenientes de las rocas aflorantes o depósitos cuaternarios. Se subdividen en dos tipos:
  - *Áridos granulares***.** Se obtienen en los depósitos de gravas, donde el material extraído se utiliza después de que se somete a procesos de lavado y clasificación por tamaño.
  - *Áridos de machaqueo.* Obtenidos a partir de la trituración, molienda y clasificación de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los áridos granulares.
- **Áridos artificiales.** En general, son aquellos que provienen de los subproductos o residuos de procesos industriales, como las escorias de las siderúrgicas, las cenizas volantes de la combustión del carbón, estériles mineros y otros.
- **Áridos reciclados.** Son los materiales procedentes de las demoliciones y el derribo de edificaciones, como hormigones, cerámicos, diferentes estructuras y, en general, todo lo concerniente a obras civiles.
- **Áridos ligeros.** Son aquellos materiales naturales o artificiales usados para obtener piezas o elementos de obra de bajo peso o aislantes.
- **Asimilados a áridos.** Se consideran dos clases: de préstamo y de escolleras.
  - *Materiales de préstamo.* Son aquellos que se utilizan sin modificar sus características naturales o, en su defecto, con pequeñas modificaciones de adición de productos estabilizantes o tratamientos mecánicos, fundamentalmente en la construcción de terraplenes y pedraplenes.
  - *Materiales de escollera.* Pueden ser de origen natural o artificial. Están constituidos por bloques de formas y características variables, siempre en función de las condiciones y especificaciones de la obra (Pla y Herrera, 2002).

1. Usos

Los usos de las arenas y gravas han sido establecidos por las mismas necesidades surgidas en el desarrollo de la industria de la construcción, y su utilización ha sido, predominantemente, un complemento entre los dos tipos de materiales. Así, es posible afirmar que la relación de tamaño de los granos, la forma, tipo de roca y composición química de la mezcla está sujeta al uso preestablecido en la aplicación final en la construcción. Estos materiales pueden emplearse sin aglomerantes o con ellos, sin que se alteren con el curso del tiempo.

Como ya se anotó, la grava gruesa o común se utiliza generalmente en la fabricación de concretos y asfaltos. Las gravas finas se usan sobre todo en fachadas, pisos, concretos y asfaltos. La combinación de gravas gruesas y finas se emplea para fines específicos, y los agregados pétreos estructurales se utilizan como agregados para el cemento. En aquellos casos en que la actividad petrolera genere el fenómeno de producción de arena, este se puede controlar mediante el uso de gravas dispuestas en cierta granulometría, de acuerdo con el tipo de formación en la cual se va a emplear (Perea, 2003).

Según Núñez (1987), las arenas de tipo industrial tienen mayores aplicaciones que las gravas. La arena limpia se utiliza para la fabricación de vidrios; con algunas impurezas, se obtienen diferentes colores. También tienen aplicación como material de relleno en algunos productos manufacturados, en fundiciones ferrosas y no ferrosas, en el filtrado de fluidos, en operación de maquinarias, así

como en la obtención de silicatos de sodio, en la industria cerámica, como abrasivos y productos refractarios. Se puede decir que son las industrias del vidrio y las metalúrgicas las que más consumen tales arenas.

1.1. Aplicaciones principales

A continuación se dará una breve explicación de los términos y usos tecnológicos más importantes de las arenas industriales.

1.1.1. Arenas para vidrios

En la industria del vidrio, la curva granulométrica de la arena es un factor que influye directamente en el rendimiento de los hornos. Si los granos son muy grandes, superiores a 0.6 milímetros, tardan en fundirse; por el contrario, si los granos son finos, inferiores a 0.074 milímetros, en los hornos se produce una alta pérdida por volatilización. Por esta razón, los consumidores son muy exigentes en lo que se refiere a la granulometría (López, 2003).

Las arenas silíceas son la fuente primaria para la elaboración de todo tipo de envases de vidrio, vidrios para fachadas y ventanas, espejos, fibra de vidrio y vidrios especiales. Para cumplir con este objetivo, las arenas deben cumplir especificaciones muy rigurosas con respecto a su pureza y a su contenido de sílice; básicamente deben ser arenas monomineralógicas, con un contenido de sílice (SiO_2) mayor de 99 %. También es muy importante la forma, y además, la variación del tamaño del grano no debe ser superior al 5 %, pues se corre el riesgo de que sean rechazadas por la mayoría de las industrias. Esta clase de arena no debe tener contenidos de óxidos de hierro y cromo, a menos que se deseen vidrios con tonalidades amarillentas o verdosas. Los análisis químicos más comunes para sílice deben contener los siguientes valores: SiO_2, 99.5 %; Al_2O_3, 0.15 %; Fe_2O_3, 0.3 %; TiO_2, 0.15 %, y CaO/MgO, un contenido de 0.055 % (López, 2003).

1.1.2. Arenas de fundición

Para este tipo de usos se requieren arenas resistentes a temperaturas elevadas, el tamaño de cuyos granos debe corresponder a arenas finas; además, su permeabilidad ha de ser buena, con el fin de facilitar el escape de los gases generados, y su punto de sinterización y cohesión debe permitir la conservación de la forma. Para satisfacer este resultado se deben agregar pequeñas cantidades de arcilla. Se emplean principalmente en la elaboración de núcleos y moldes para recibir fundidos de metales comunes y como componente de los productos refractarios.

1.1.3. Arenas para máquinas

Para esta clase de usos, las arenas deben ser de grano fino, bien sorteado, duro y seco. Una de sus aplicaciones consiste en evitar que las ruedas y engranajes de algunas máquinas patinen o se deslicen; en otra aplicación se usa para retirar el hollín de los conductos de escape de humo de las locomotoras y de otras máquinas que funcionan con combustibles fósiles.

1.1.4. Arenas abrasivas

Para que las arenas puedan ser empleadas como abrasivos deben cumplir con ciertas características, como tener buena dureza, grano uniforme, estar limpias, ser ásperas (angulosas, rugosas) y, un aspecto importante, estar libres de algún tipo de arcilla. Son impulsadas a gran velocidad mediante aire o agua a presión y utilizadas para remover pintura, costras de oxidación, para enlucir o pulir piedras de enchape, para pulir metales y otros elementos. También es importante en la fabricación de papel de lija.

1.1.5. Arenas metalúrgicas

Las arenas que se utilizan en la industria metalúrgica deben ser refractarias y muy limpias. Por lo general se les añade una pequeña porción de arcilla para obtener una mejor capacidad de liga. El tamaño deseado de los granos debe estar entre medio y fino. Uno de los principales usos, en determinados procesos metalúrgicos y de fundición, es el de agente fundente, para óxidos básicos; otra utilización se concentra en el revestimiento del fondo y paredes de los hornos metalúrgicos; también es fundamental en la obtención del producto ferrosilicón, proceso para el cual se utiliza como fuente de silicio.

1.1.6. Arenas y gravas para filtros

Se caracterizan por ser arenas y gravas o gravillas (dependiendo del tamaño) limpias, con un tamaño de grano uniforme, buena permeabilidad, muy cuarzosas, carentes de arcilla, materia orgánica o cualquier sustancia extraña. Su principal uso es como filtro, para eliminar bacterias y sólidos, en plantas de tratamiento de agua para el consumo humano. El engravillado también se utiliza en la construcción de pozos para extraer agua subterránea, caso en que el tamaño del grano es específico, y depende del tamaño de la arena del acuífero y de la rejilla utilizada.

1.2. Otros usos

Las arenas y gravas son empleadas en múltiples situaciones, aparte de las mencionadas; por ejemplo, en la fabricación de

morteros y concretos epóxicos, que se caracterizan por su resistencia a grandes esfuerzos y uso de alto tráfico peatonal, tal como almacenes de cadena, bancos, entidades gubernamentales y lugares donde hay movimiento de maquinaria pesada, etcétera. Asimismo, se emplean como lecho en cultivos hidropónicos, como germinadores de plantas ornamentales, uso que se ha incrementado en la última década.

El fenómeno de producción de arena en la actividad petrolera se conoce internacionalmente como s*and production*. En Colombia no existen registros de niveles de producción de arena, y mucho menos una caracterización de los materiales granulares en las áreas en las que hay actividad petrolera. Ensayos de laboratorio han permitido concluir que esta producción se puede controlar en función de la salida del hidrocarburo o de los tiempos de explotación de los pozos; en algunos casos el fenómeno se puede controlar mediante el uso de gravas dispuestas en cierta granulometría, según el tipo de formación en la cual se vaya a utilizar (Perea, 2003).

Las compañías petroleras utilizan comúnmente arena para filtros de los pozos petroleros; en estos casos la granulometría requerida debe estar entre 1.17 y 1.69 mm. En Venezuela, que tiene enormes reservas de petróleo y grandes explotaciones, se consumen cerca de 50 000 toneladas de arena por año.

Adicionalmente, estos materiales tienen aplicaciones en la mezcla del pavimento para carreteras o también en forma de concreto con cemento pórtland. De la misma manera se utilizan en diferentes obras civiles, como hechura de gaviones, terraplenes, afirmados, etc. Hay que tener presente que cuando las gravas y arenas disponibles no cumplen con la granulometría requerida, esto se puede suplir efectuando una mezcla nueva de arena y grava, con el fin de obtener relaciones de agregados finos y gruesos, de modo que el agregado específico requerido envuelva las partículas más finas de la arena y las más gruesas de la grava. La mezcla o gradación más utilizada es la planteada por Fuller y Thompson (Niño, 1998).

Cuando los agregados finos y gruesos se mezclan con agua y cemento se produce el denominado concreto, donde dichos agregados ocupan cerca del 70 % del volumen de este. El tipo de agregado, sus propiedades y la proporción de la mezcla son factores claves para obtener resultados que no afecten las características del concreto, como la densidad, resistencia, durabilidad y conductividad térmica. De igual manera, la forma, textura y capacidad de absorción de agua de estos agregados son otros elementos que influyen en la trabajabilidad, la resistencia y el requerimiento de agua en el concreto (Harrison y Bloodworth, 1994).

Los agregados finos se usan también en la fabricación de morteros, que son el resultado de la mezcla de arena natural de tamaño fino con un cemento de caliza o yeso que actúa como pegante o de cobertura, que se utiliza comúnmente en la mampostería. La arena empleada debe ser dura, durable y limpia. La presencia de arcilla no es deseable. La arena es el mayor constituyente, y la calidad del mortero depende del tamaño de la partícula, la forma de la arena y la presencia de impurezas en esta (Maya, 2003).

Se puede afirmar que para la construcción de una casa nueva típica se emplean más de 400 toneladas de áridos (entre productos finales y hormigón), desde los cimientos hasta las tejas. La construcción de hospitales, escuelas, puentes y diques es posible gracias a los áridos. Por ejemplo, para construir una escuela se requieren más de 3000 toneladas de áridos, y para un estadio deportivo, cerca de 300 000 toneladas.

Según la Unión Europea de Productores de Áridos, las arenas y gravas son fundamentales en la construcción de carreteras. Esta entidad asegura que en todos los niveles, desde la base hasta la superficie de rodadura, se utilizan materiales naturales resistentes al desgaste, que aseguran resistencia al deslizamiento. La construcción de un kilómetro de autopista implica el uso de más de 30 000 toneladas de arenas y gravas. Los áridos son fundamentales como balasto para la industria ferroviaria europea.

Se conoce como balasto la grava o piedra machacada (triturada) que, formando una capa, se extiende sobre la explanación de una vía férrea para asentar sobre ella y sujetar las traviesas que soportan los rieles o carriles. Su objetivo es, además, proporcionar una base de drenaje lo suficientemente estable como para mantener la alineación de la vía con un mínimo de mantenimiento.

Para este uso concreto se requieren rocas resistentes al desgaste por abrasión y al ataque químico, capaces de resistir el desgaste y la degradación que sobrevienen por efecto del martilleo producido por el tráfico ferroviario. Los basaltos cumplen con estas premisas; de hecho, son materiales que se han aplicado en la construcción de la vía del tren de alta velocidad que viaja entre Madrid y Sevilla (Higueras y Sánchez, 1997).

En la construcción de un metro de vía de la red de trenes de alta velocidad española se utilizan más de nueve toneladas de áridos; un hospital o colegio de tamaño medio puede requerir entre 4000 y 15 000 toneladas de áridos; una vivienda multifamiliar, entre 100 y 300 toneladas, y 1 m^3 de hormigón necesita entre 1.8 y 1.9 toneladas (Regueiro y González, 2004).

Se puede generalizar que las arenas utilizadas para estos usos específicos provienen por lo regular de depósitos de ríos, de arenas de playa y de algunas formaciones geológicas constituidas básicamente por niveles de arenitas cuarzosas sometidas a procesos de lavado y clasificación. En la tabla 2 se muestra el resumen de las principales aplicaciones de las arenas y gravas.

Tabla 2. Usos industriales de las arenas y gravas

Material	Industrias	Usos
Arenas silíceas	Vidrio	En fachadas, ventanas, fibra de vidrio y vidrios especiales
Arenas abrasivas	Construcción	Remoción de pinturas, costras de oxidación, pulido de piedras para enchapes y pulidos metálicos
Arenas y gravas para filtros	Filtros y petróleo	Filtros en agua para eliminar bacterias, engravillados en pozos para aguas subterráneas y en controles en la producción de arenas en los pozos de petróleo
Arenas en metalurgia	Metalurgia	Como agente fundente para óxidos básicos; en revestimiento de paredes en hornos metalúrgicos
Arenas para fundición	Metalmecánica	Como limpiadoras en ductos de locomotoras y similares; en la fabricación de discos y campanas para frenos (proceso de fundición en espuma perdida, FEP). La arena sirve como vía de escape de los gases generados por la evaporación de la espuma al producirse el vaciado del metal fundido.
Otros usos	Construcción de vías y cemento	Hechura de gaviones, terraplenes, afirmados y en la obtención del cemento pórtland.

Fuente: Núñez (1987); Fernández, Martínez, Duque y Cruz (2007)

Conviene hacer referencia a los parámetros considerados por la industria con el fin de aplicar el comportamiento técnico de las rocas a los usos específicos requeridos. Se hace la salvedad de que, dependiendo de la normativa y el lugar de origen de la roca, los valores de los parámetros que se han tenido en cuenta para rocas similares pueden tener algunas variaciones. En las tablas 3 y 4 se muestran los principales ensayos considerados en la determinación de las propiedades técnicas de las rocas.

Tabla 3. Propiedades técnicas de agregados minerales a partir de algunas rocas, parte 1

Rocas (1)	Adsorción de agua (%)	Resistencia a la comprensión (N/mm²) (2)	Coeficiente de impacto (%)
	Rango (media) (4)	Rango	Rango (media)
Andesita/traquita	1.4-7.9 (3.0)	219-280	12-31 (18)
Basalto	0.4-5.4 (1.8)	160-310	10-22 (18)
Pedernal (sílex)	0.4-7.6 (1.6)	200	16-24 (20)
Gabro/dolerita	0.2-5.7 (0.6)	180-190	9-40 (18)
Neis/granulito	0.4-0.7 (0.6)	—	24-28
Granito	0.2-1.9 (0.6)	150-250	1-35 (21)
Cornubianita	—	340-370	16-17
Caliza/dolomita	0.2-7.5 (1.6)	130-190	14-34 (24)
Cuarcita	0.7-1.2 (0.7)	280-390	13-22
Arenita	0.3-31.0 (1.0)	190-260	10-58 (18)
Serpentina	0.5-6.6 (1.4)	—	17-23 (21)
Esquisto	1.8-3.0	—	20-22
Escoria de altos hornos	2.0-4.8	90	15-33 (28)

(1) Datos de fuentes internacionales; 2) ensayos con probetas cilíndricas de 25 mm de diámetro; 3) ensayos según ASTM C88, después de cinco ciclos; 4) valor medio (mediano)

Fuente: Smith y Collis (2001)

Tabla 4. Propiedades técnicas de agregados minerales a partir de algunas rocas, parte 2

Rocas (1)	Coeficiente de fragmentación (%)	Coeficiente de 10 % de finos (kN)	Estabilidad de volumen $MgSO_4$ (%)(3)
	Rango (media)	Rango (media)	Rango (media)
Andesita/traquita	11-12	170-190 (180)	0-96 (4)
Basalto	11-58 (19)	160-350 (220)	0-16 (2)
Pedernal (sílex)	14-31 (16)	160-320 (236)	0-6 (3)
Gabro/dolerita	11-36 (19)	50-380 (190)	0-1
Neis/granulito	—	230	1-2 (1)
Granito	13-32 (24)	75-280 (155)	1-31 (2)
Cornubianita	nov-15	—	—
Caliza/dolomita	19-31 (24)	110-250 (170)	0-71 (6)
Cuarcita	16	140-250 (195)	—
Arenita	12-31 (15)	100-350 (200)	0-100 (4)
Serpentina	—	150-260 (240)	3-17 (8)
Esquisto	19-22	140-170	—
Escoria de altos hornos	33-42 (34)	55-210 (85)	—

(1) Datos de fuentes internacionales (2) Ensayos con probetas cilíndricas de 25 mm de diámetro (3) Ensayos según ASTM C88, después de cinco ciclos (4) Valor medio (mediano)

Fuente: Smith y Collis (2001)

2. Ambiente geológico

2.1. Características

Se establece en la literatura geológica que un medio sedimentario se caracteriza por conformar una parte de la superficie terrestre donde operan procesos sedimentarios responsables del transporte y depósito de los sedimentos y que se diferencia física, química y biológicamente de las zonas adyacentes. Es posible afirmar que un ambiente de depósito sedimentario puede ser un lugar de erosión, de no depósito o de sedimentación, y estos tres se pueden alternar en el tiempo, en el mismo medio sedimentario.

En los nacimientos de los ríos, por su alta pendiente, la corriente de agua puede originar, dependiendo de su caudal, energía suficiente como para ocasionar desprendimientos de grandes bloques de roca y depositarlos en su cauce. Estas mismas corrientes de agua, kilómetros más abajo, se comportan como de tipo erosivo y poco a poco originan cañones y valles cada vez más anchos; eventualmente pueden llegar a conformarse valles regionales donde la velocidad de la corriente disminuye notoriamente, a tal punto que puede cesar su acción erosiva. En este estado, el río descarga los diferentes sedimentos. Según la manera como llegan estas corrientes a las áreas planas, el material detrítico forma conos o abanicos aluviales al depositarse.

Es normal que estos ríos divaguen en forma de meandros en las llanuras y valles, lo cual es propicio para depositar en las partes más bajas sedimentos finos, arenas de grano fino y arcillas, y arenas y gravas en las partes externas de estas depresiones.

En las costas, las características de los sedimentos clásticos depositados dependen de la distancia entre el litoral y el sitio de donde proceden, así como de la profundidad del mar. A medida que aumenta la profundidad del mar, y a mayor distancia de la costa, los materiales se depositan de acuerdo con esta secuencia: bloques de rocas desprendidos de los acantilados, gravas, arenas, limos y arcillas.

Vale la pena mencionar de nuevo los tamaños de estos fragmentos rocosos: las acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas procedentes de su desintegración mecánica constituyen la grava. Suelen llamarse *gravillas* cuando su diámetro varía entre 4 y 64 mm, *grava* cuando el tamaño está entre los 64 y 256 mm, y *bloque* si su diámetro es mayor de 256 mm. El término *arena* se usa en general para definir los materiales granulares relativamente finos que provienen de la denudación de las rocas o de su fragmentación artificial, con tamaños de granos menores de 2 mm y mayores de 0.0625 mm de diámetro.

Por otro lado, la unidad morfológica *playa* está definida por la franja de material no consolidado donde se depositan arena o grava, localizada en la interfase mar-continente. Estos depósitos están compuestos por arenas de grano fino a medio, cuya composición y color varían según el origen de los sedimentos. La extensión aproximada del litoral caribe colombiano es de 1642 km, y la del

litoral pacífico colombiano de 2188 km (Ceballos, 2002). La extensión total real de las playas arenosas, tanto para el Caribe como para el Pacífico, no se conoce hasta la fecha.

2.2. Tipo de depósito

En general, se establecen dos tipos de depósitos para la formación de arenas y gravas: *sedimentarios* y *por meteorización*. Los sedimentarios son no consolidados y corresponden al resultado de la fragmentación de rocas, transporte, abrasión y, finalmente, su depositación. Una característica fundamental de la mayoría de estas acumulaciones es que se encuentran asociadas con las riberas de los ríos y en corrientes de agua. La arena y la grava se presentan como capas sedimentarias, como lentes, como bolsas e interestratificadas con otras capas sedimentarias. Básicamente, se desarrollan en los siguientes ambientes de depositación: en la formación de depósitos fluviales o de llanuras de inundación, depósitos de playa o litoral, depósitos eólicos, dunas, glaciales y marinos (figura 1).

En el medio fluvial, el agente principal en la formación de los yacimientos de material clástico es el río, cuya pendiente o inclinación rige el tipo de material que se forma y se deposita. Por lo regular, estos depósitos presentan una geometría de canales y lentejones superpuestos, barras alargadas arenosas entre materiales más finos y poca sinuosidad de los canales. Se ha establecido que la mayor parte de la producción comercial proviene de esta clase de depósito, utilizada principalmente en la industria de la construcción.

En el medio litoral o de playas se pueden identificar varias formas en sentido normal a la costa: acantilados, plataforma de abrasión y barras arenosas. Estos aspectos hacen que el medio litoral sea una fuente de grandes volúmenes de material clástico, cuyos tamaños pueden variar desde bloques hasta arcillas, pasando por gravas y arenas. Esta distribución de tamaños depende de la energía del oleaje y de las corrientes marinas. La geometría de dichas facies presenta formas variables de tendencias alargadas, algo curvadas y paralelas a la costa (Corrales, Rosell, Sánchez de la Torre, Vera y Vilas, 1977).

Las arenas y gravas depositadas en el medio eólico tienen al aire como agente fundamental de selección. Por este medio, los sedimentos finos viajan en suspensión y las arenas más gruesas lo hacen por saltación. Las gravas difícilmente se pueden transportar. Con base en esta situación se establece una selección natural de material uniforme, que se desarrolla de acuerdo con el tamaño de las partículas, dunas de grano, tamaño arena, sectores de cantos y fragmentos de gravas, y suelo rocoso que presenta la roca viva a la abrasión (López, 2003). Estos medios forman bancos de tendencia planar irregulares, superficies truncadas con sedimentos de aspectos ondulados, además de dunas y cordones (Corrales *et al.*, 1977).

Por último, se originan medios glaciales por la acción del hielo y deshielo, acción esta que permite el transporte del material; en general, el material transportado y acumulado por el glacial se denomina *morrena*. La extensión de los depósitos glaciales es grande y cubre amplios valles. En definitiva, en este medio abundan los sedimentos de material grueso y desaparecen por lavado las arcillas y limos. Son de formas arriñonadas, bandas alargadas, con lentejones dispuestos irregularmente.

A modo de información, en la tabla 5 se presenta un resumen de los medios sedimentarios, entre ellos algunos que desde el punto de vista económico no son los más favorables para la producción de gravas.

Tabla 5. Ambientes sedimentarios clásticos

Ambiente sedimentario		Agente de transporte	Sedimentos
Continental	Aluvial	Ríos	Arena, grava, lodo
	Desértico	Viento	Arena, polvo
	Lacustre	Corrientes de lago	Arena, lodo
	Glacial	Hielo	Arena, grava
Costero	Delta	Ríos, corrientes marinas	Arena, lodo
	Playa	Oleaje, mareas	Arena, grava
	Planicies de inundación	Corrientes	Arena, lodo
Marino	Plataforma continental	Oleaje, mareas	Arena, lodo
	Margen continental	Corrientes marinas	Lodo, arena
	Fondo marino	Corrientes marinas	Lodo

Fuente: Corrales ***et al.*** (1977)

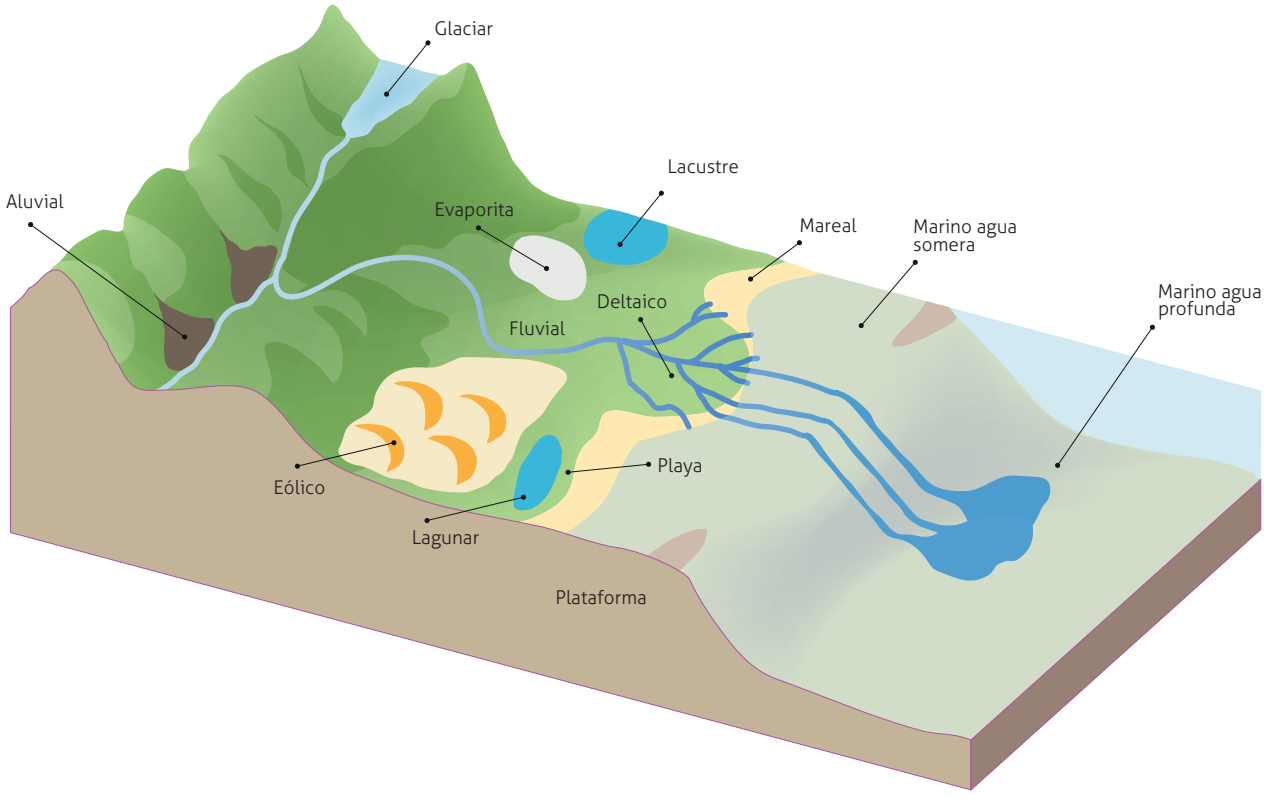


Figura 1. Esquema de ambientes sedimentarios

Fuente: Modificado de Dawes (2013)

Maya (2003) considera que los depósitos sedimentarios de arenas y gravas se desarrollan como acumulaciones de fragmentos de rocas y minerales que provienen de la desintegración de rocas preexistentes y su posterior transporte. El agua es uno de los agentes que más distribuyen estos materiales, lo cual genera a su vez procesos de abrasión y, por último, la sedimentación. De esta manera resultan depósitos no consolidados a ligeramente consolidados, que se forman cerca de ríos y demás corrientes de agua.

En resumen, se puede establecer que los depósitos que conforman gravas y arenas incluyen fragmentos rocosos de diferentes tamaños, que pueden variar desde tamaño arcilla, limos, arenas finas, medias, gruesas, gránulos, hasta guijarros y bloques, y que según la fuente de aporte, pueden incluir rocas ígneas, volcánicas, metamórficas y sedimentarias, o, como ocurre generalmente, una combinación en mayor o menor proporción de cada una de ellas.

Con base en lo anterior, se concluye que las arenas y gravas se han desarrollado en depósitos no consolidados del Cuaternario, como terrazas, abanicos aluviales, conos de deyección, de playa, glaciales, derrubios o coluvios, ríos meandriformes, ríos trenzados, cauces actuales y brechas de falla. Cuando estos sedimentos se presentan consolidados se denominan *arenitas de cuarzo* y *conglomerados*, y conforman grandes secuencias sedimentarias potencialmente económicas para la industria de los áridos.

En lo que respecta a los depósitos originados por meteorización, básicamente son los producidos por la descomposición química y mecánica de una roca *in situ*. Mediante este fenómeno natural, la roca, por lo general de composición granítica, origina grandes acumulaciones de material arenoso (cuarzoso). Para este proceso se ha definido que el agente que más ocasiona la meteorización es el agua, que descompone los minerales feldespáticos a fracciones arcillosas, al tiempo que deja libres los cristales de cuarzo y mica. A partir de procesos de beneficio y tamizado se separan algunos minerales no deseados, de lo cual se obtienen arenas silíceas, aptas para su empleo en la industria.

Es importante mencionar que la calidad de los agregados naturales está definida fundamentalmente por los parámetros físicos y químicos, y se puede establecer que unos dependen de los otros. La calidad física está definida como satisfactoria, aceptable y pobre; la calidad quí-

mica, como inofensiva y nociva. Químicamente, pueden ser nocivas aquellas rocas que tienen sílice, que puedan reaccionar con los álcalis del cemento (rocas hipoabisales porfídicas), y además las que tienen presencia de micas hornbléndicas, andesitas augíticas, porfídicas, basaltos y diabasas (Maya, 2003).

A partir de las rocas litificadas, mediante procesos de trituración, clasificación y selección del tamaño de los granos (por tamizado industrial) se obtienen agregados naturales, no solo de las areniscas y conglomerados, sino también de diferentes tipos de rocas, como calizas, lavas volcánicas, sienitas, basaltos, pórfidos y cuerpos graníticos relativamente frescos, de composición ácida, intermedia y básica. Mediante esta consideración se ha concluido que los ambientes de formación de los agregados pétreos naturales son similares a los de las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas (Rodríguez, 2002).

Los agregados pétreos obtenidos de rocas metamórficas se utilizan con ciertas restricciones, principalmente cuando su carácter esquistoso, tabular o laminar es muy notorio, ya que estas características pueden originar en los concretos, por ejemplo, imperfecciones como fracturas y debilidades, debido a su esquistosidad.

Hay que tener en cuenta que en la industria de los agregados no se cumple estrictamente la terminología petrográfica común en la descripción de las rocas fuentes para piedras trituradas. Así por ejemplo, el término *caliza* puede referirse a una caliza propiamente dicha, a una dolomita o a mármol no pulido. Lo mismo sucede con el caso de una roca intrusiva máfica (gabro) grueso granular, de aspecto negro, que por lo general se denomina comercialmente *granito negro,* término que incluye a los basaltos y las andesitas.

Para mayor claridad, más adelante se hará una breve reseña de los tipos de rocas (sedimentarias, ígneas y metamórficas) utilizados en la obtención de piedras trituradas.

2.2.1. Rocas sedimentarias

Las calizas y dolomitas, cuando se presentan duras y densas, son una buena fuente de piedras de trituración. Cuando estas se encuentran friables y relativamente blandas pueden tener gran adsorción, y en general dan agregados de pobre calidad. El chert y la porcelana pueden utilizarse para piedras trituradas; sin embargo, estas rocas son muy duras de triturar y además pueden causar reacciones químicas adversas con el álcali del cemento pórtland, cuando se usan como agregado para el concreto.

Las rocas clásticas sedimentarias, incluyendo conglomerados, brechas y arenitas de cuarzo (duras y macizas), también se emplean como piedra para trituración. En la tabla 6 se muestran los tipos más comunes de rocas sedimentarias que sirven como fuente de piedra triturada.

Tabla 6. Rocas sedimentarias utilizadas comúnmente como piedra triturada

Material inconsolidado	Material consolidado
Clásticos	
Fragmentos gruesos angulares	Brechas
Gravas	Conglomerados
Arenas	Arenita (silícea**, calcárea, arcillosa, ferruginosa). Con otros constituyentes pueden ser arcosas o grawacas
Química y bioquímica	
Calcárea	Caliza*, dolomita*
Precipitación química	Pedernal**, chert

* Rocas utilizadas comúnmente como agregados; ** Rocas que pueden ser reactivas con el álcali del cemento

Fuente: Maya (2003)

2.2.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas frescas son en general duras, resistentes y densas, y constituyen una excelente fuente de piedras de trituración. Algunas rocas ígneas extrusivas (andesitas) pueden ser porosas, por lo que resultan inapropiadas como fuente de agregados. Otras son altamente silíceas y pueden reaccionar con el álcali del cemento pórtland. Cuando estas rocas presentan alta fracturación, constituyen flujos de lavas con diaclasamiento intenso, incluyen vesículas o están brechadas, son inutilizables como agregados. Igualmente, los materiales volcánicos piroclásticos, como cenizas y tobas, si han sido endurecidos por calentamiento y compactados por enterramiento a lo largo del tiempo geológico, pueden aprovecharse como piedras para triturados. En la tabla 7 se muestran los tipos petrológicos primarios de rocas ígneas basados en su composición, tamaño de grano y textura.

Tabla 7. Tipos petrológicos de rocas ígneas comunes, clasificados según composición general y tamaño de grano

Características para los agregados	Rocas ígneas de composición ácida	Rocas ígneas de composición intermedia	Rocas ígneas de composición básica
Rocas plutónicas de grano grueso con tamaño de grano mayor de 5 mm. Pueden ser frágiles por presentar cristales grandes.	Granito	Sienita	Gabro
	Granodiorita	Diorita	Peridotita
	Cuarzomonzonita	Cuarzodiorita	Dunita
Rocas hipoabisales de grano medio (entre 1 y 5 mm); cristales intercrecidos. Comúnmente, buen agregado.	Granófiro	Pórfido	Diabasa
		Porfirita	
Rocas extrusivas, finogranulares, tamaño de grano menor de 1 mm (no observable al ojo humano). Algunas rocas pueden ser frágiles y astillosas. Otras pueden ser reactivas al álcali-cemento. De otra forma son buenos agregados.	Riolita	Traquita	Basalto
		Dacita*	Andesita*
Rocas ígneas extrusivas (vítreas). Algunas pueden ser frágiles y astillosas; otras pueden ser positivas a la reacción álcali-agregado.	Pumita		Escoria
	Obsidiana		
Variación continua en propiedades y composición	Color claro	Cuarzo entre 66 y 52 %	Color oscuro
	Densidad relativa baja (2.6)		Densidad relativamente alta
	Alto porcentaje de cuarzo (66 %)		Cuarzo entre 52 y 45 %
	Presencia de feldespato potásico		Alto porcentaje de minerales ferromagnesianos
			Presencia de plagioclasa cálcica

* Puede ser reactivo con el álcali del cemento

Fuente: Maya (2003)

2.2.3. Rocas metamórficas

Entre las rocas metamórficas están los esquistos, que por naturaleza son altamente foliados, característica que los condiciona como no utilizables en agregados. Los mármoles con estructura isotrópica se emplean como piedra triturada, al igual que las cuarcitas.

En la tabla 8 se muestra la variedad de rocas metamórficas comunes y la roca de origen.

Tabla 8. Tipos comunes de rocas metamórficas y su roca de origen

Tipo de roca	Roca original	Bajo grado de metamorfismo	Medio y alto grado de metamorfismo
Rocas foliadas	Limolita, arcillolita	Pizarras	Filitas, esquistos, neis*
	Arenitas arcillosas		Esquisto cuarzo micáceo y neis finogranular
	Caliza arcillosa	Mármol*	Esquisto calcáreo
	Granito	Metagranito	Neis granítico,* esquisto cuarzo micáceo
Rocas no foliadas	Cualquier roca de origen		Cornubiana* (recristalización con rasgos originales conservados)
	Arenita de cuarzo	Metarenita	Cuarcita*
	Caliza y dolomita	Mármol*	

* Rocas metamórficas utilizadas como agregados

Fuente: Maya (2003)

La mayoría de los países del mundo cuentan con unidades geológicas generadoras de gravas y arenas que se utilizan básicamente en el consumo interno; sin embargo, algunos países requieren arenas especiales, y por eso estas se exportan e importan. Las cifras de recursos y reservas por nación en general son desconocidas, pero con seguridad son significativas y suficientes para abastecer los mercados nacionales. Aquellos países que a nivel mundial son reconocidos como grandes productores de material para la construcción, como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Italia, España y

Portugal, aparte de abastecer sus mercados internos, son exportadores por excelencia de estos agregados.

2.3. Métodos de prospección

En general, la prospección debe realizarse siguiendo, al igual que con otros minerales, estas 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 efectúa con el propósito de identificar el depósito que puede servir para la exploración, llevando a cabo actividades de tipo regional, semiregional y detallado, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo y trabajos geofísicos con métodos geoeléctricos, preferentemente; no obstante, la cartografía geológica constituye el principal método de prospección.

La exploración permite hacer la delineación tridimensional pormenorizada de los depósitos, en cuatro fases, así:

- Fase I. Exploración geológica de superficie
- Fase II. Exploración geológica del subsuelo
- Fase III. Evaluación y modelo geológico (figura 2)
- Fase IV. Programa de trabajos y obras (PTO) (viabilidad técnica y económica)

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, túneles y núcleos de perforaciones (MinMinas, 2013).

En los estudios previos hay que definir el comportamiento del grado de uniformidad de la secuencia que se va a explotar, composición del material y tamaño de los agregados, tanto en sentido horizontal 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 del costo de la actividad de remoción del material estéril que cubre el depósito y de su traslado a los sitios de acopio.

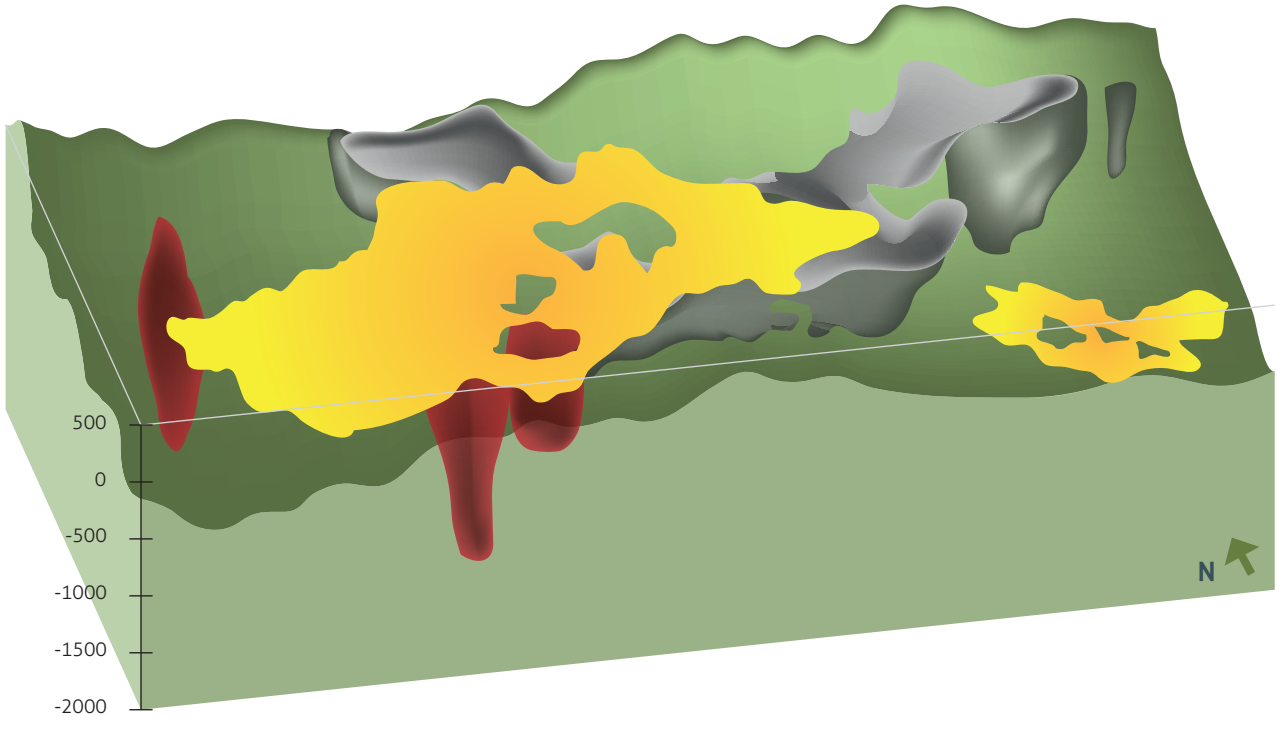


Figura 2. Modelo geológico

Fuente: Ayala y Rey (2009)

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

Es posible asegurar que la explotación de las arenas y gravas incluye primordialmente dos métodos de extracción: a cielo abierto e hidráulica, o bajo agua. Esta situación se debe por lo general a que los sedimentos recientes están ubicados en terrazas, llanuras de inundación, coluviones, que a su vez afloran relativamente cerca de la superficie; cuando algunos de estos depósitos están en las proximidades del cauce de río, parte del recurso se encuentra por debajo del nivel freático o bajo agua, y parte sobre la superficie seca.

En la extracción a *cielo abierto*, en el caso de las gravas y arenas se utiliza el término *cantera* para referirse a una explotación superficial, no mayor de 50 m de altura, por lo general con un solo banco, o muy esporádicamente con más de uno, desarrollada en un área relativamente pequeña, donde, en la mayoría de los casos, el material que se va a explotar aflora y la cubierta de vegetación y el estéril no ocasionan mayores costos de remoción.

El objetivo básico es conseguir una granulometría vendible, y el factor que más incide en su precio es la distancia respecto de los centros de consumo. En esta actividad se puede decir que no existen graves problemas de reservas. La competencia es grande y la tecnología ha sido más bien escasa y retrasada, por lo cual aún es fácil encontrar en ellas todo el historial de la maquinaria y de las formas de energía y trabajo que se han aplicado en la minería a cielo abierto, desde los sistemas de pico y pala, los martillos de mano, la pólvora, los carros de tracción animal y el machaqueo manual, hasta los medios más modernos, como la utilización del *scraper*, buldócer, cintas transportadoras, todo de acuerdo con la capacidad y voluntad del cantero. En esta actividad es importante tener el sentido de la competencia y el control de la calidad, para alcanzar un progreso óptimo que incluso abarate los costos de producción (Pla *et al.*, 2002).

En la figura 3 se muestra en forma esquemática las actividades que comprende la explotación.

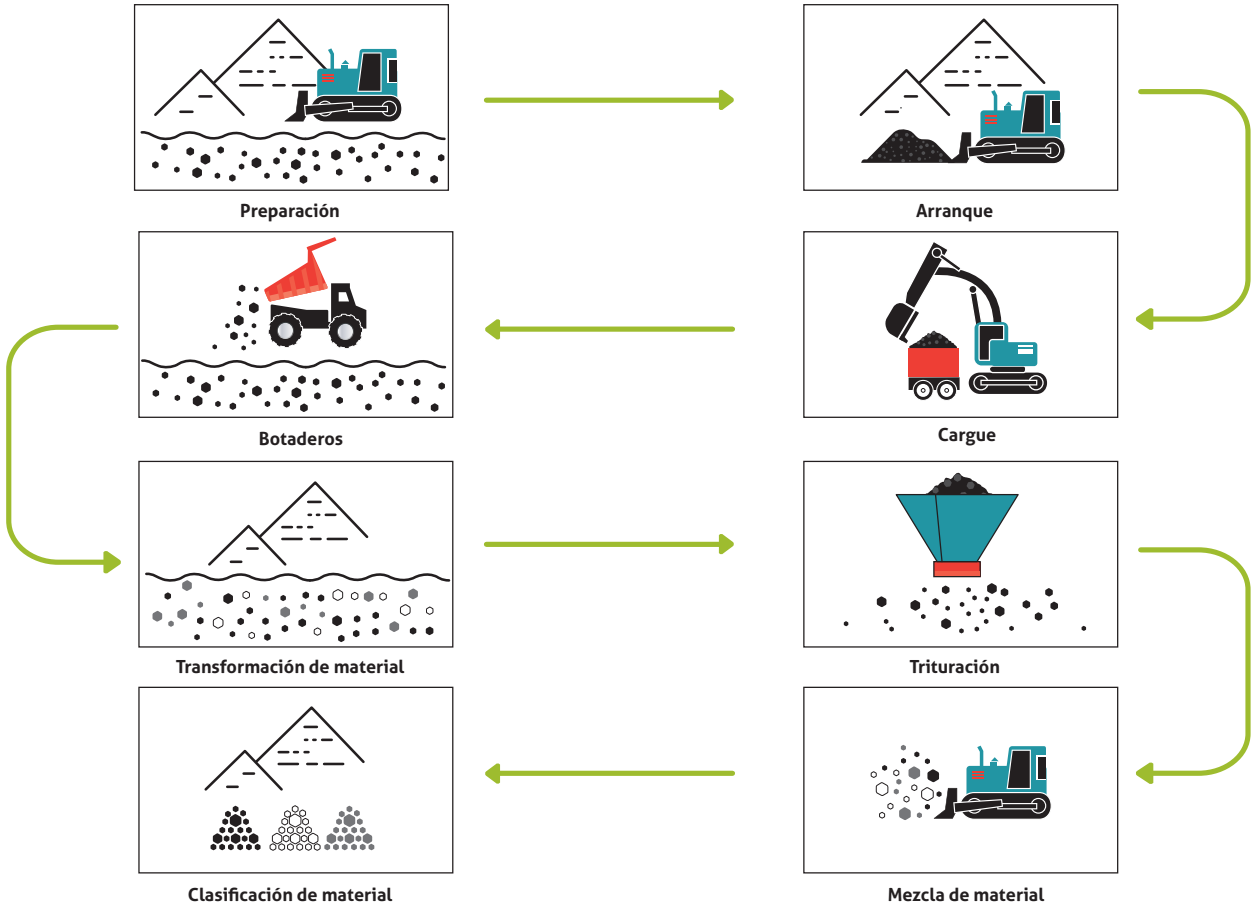


Figura 3. Esquema de una explotación, trituración y selección de material pétreo

Fuente: modificado de MinMinas (2013)

Las características más sobresalientes, que pueden considerarse comunes a las explotaciones de cantera, según los autores, son:

- La demanda de productos de cantera, que tiene en general una clara trayectoria ascendente en función del crecimiento de la población y de la riqueza per cápita.
- Las especificaciones de los productos extraídos son cada vez mayores y de difícil cumplimiento, a causa de la existencia de criterios de calidad y garantía en el cumplimiento de sus características y propiedades.
- Las técnicas de explotación deben cumplir la normativa de los organismos estatales que rigen el medio ambiente.

El sector presenta una fuerte atomización y dispersión de explotaciones, razón por la que hoy en día tiende a disminuir el número de explotaciones y se busca un mayor tamaño de estas, lo que ha dado origen a las modernas supercanteras. La tendencia actual es instalar plantas móviles de preparación y lavado que siguen al banco y permiten el paso al uso de unos sistemas continuos de manejo y almacenamiento. El lavado y la clasificación por tamaños permiten un mejor aprovechamiento del yacimiento. Es el caso de las arenas silíceas, cuyo uso puede ser tan simple como el de participar en la mezcla utilizada en la construcción, o más sofisticado, como material empleado en la fabricación de vidrio o de chips electrónicos, con el consiguiente incremento de su precio de venta y la natural exigencia de una calidad del producto final de la cantera (figura 4).

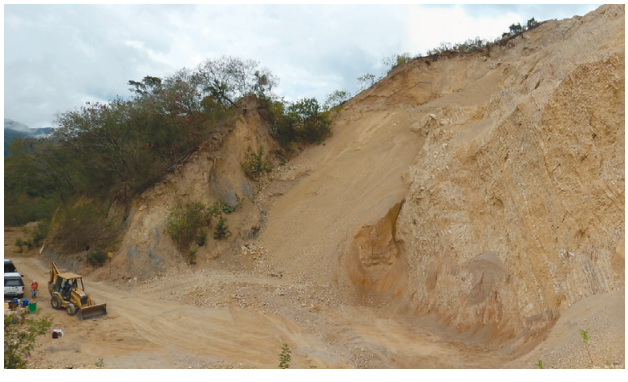


Figura 4. Fotografía de extracción de material en canteras en la vía Coello-Chicoral, margen vial derecha
Material de explotación de cantera correspondiente a la formación Lidita Superior del Grupo Olini. Se observa una separación de dos paquetes de roca: hacia la parte superior, porcelanitas y areniscas fosfáticas, y en la parte inferior, niveles de chert y lodolitas. Vista hacia la 65.° Estación Geológica EG-1176, N = 958 297, E = 902 683 Cota = 443 m. s. n. m.

Fuente: SGC (2017)

El segundo sistema de extracción de arenas, gravas y otros minerales es el método *hidráulico*, que emplea el agua como una herramienta disgregadora del material o aquel que se realiza desde la superficie de un lago, río o mar. El método va desde la operación manual de batea hasta el empleo de la gran maquinaria de dragado, de los monitores de agua a gran presión y del transporte por tubería de hidromezcla (figura 5).

Normalmente, los equipos van instalados sobre botes, planchones o barcas. Los equipos tradicionales son las dragalinas, dragas excavadoras de cangilones, de succión y de cuchara. Es uno de los métodos más antiguos de explotación minera, que ha tenido notables avances gracias al desarrollo de máquinas de gran capacidad de arranque, carga y transporte, así como de extracción a mayores profundidades. Se utiliza fundamentalmente en la extracción de arenas y gravas de ríos, al igual que en la minería de algunos minerales pesados, como el oro, la plata, el diamante, el estaño y el wolframio. Es importante mencionar que estos materiales pueden procesarse en el sitio de extracción, o transportarse a tierra para su beneficio.



Figura 5. Fotografía de extracción por el método hidráulico

Fuente: https://pxhere.com/es/photo/811725

El sistema de procesamiento o beneficio, en el caso de las arenas y gravas, involucra inicialmente los procesos de trituración, utilizando máquinas denominadas *machacadoras de mandíbulas*. Generalmente, estas máquinas se adaptan a tamices o cribados para seleccionar partículas de determinado tamaño. A la par con el tamizado se lavan con agua para quitar impurezas. Las partículas de tamaños apropiados son llevadas a una pila de almacenamiento por medio de bandas transportadoras, palas elevadoras o volquetas. Los materiales retenidos vuelven a ser triturados hasta que alcancen los tamaños que se especifiquen; si se

requieren tamaños más finos, son llevadas por medio de bandas transportadoras o volquetas a un molino de bolas, donde después del proceso se selecciona el material requerido y se transporta a un depósito especial (tabla 9).

Con referencia al tema ambiental, los gobiernos en general promueven normas restrictivas tanto a la minería actual como a los nuevos proyectos de explotaciones de áridos. Por esta razón, en Alemania, el Reino Unido, Francia y países nórdicos se observa una tendencia decreciente en la extracción de arenas y gravas, debido a que en dichos estados las normas relacionadas con el medio ambiente permiten hacer explotaciones de arenas y gravas en la plataforma continental, que representan un porcentaje aproximado del 40 % de la producción total. En el Reino Unido, por ejemplo, de los 204 millones de toneladas de áridos producidos en el 2003, el 6 % correspondió a áridos marinos, el 34 % a gravas y arenas y el resto a triturados (Highley, 2005).

Tabla 9. Material obtenido a partir de la explotación de canteras de arenas y gravas

Triturados	Se denominan así los agregados utilizados en la preparación de concretos reforzados y en la conformación de bases utilizadas en la construcción de vías. Se dividen en tres clases:	
	De primera	Diámetro aproximado: 2.5 cm. Utilizados en concretos y bases de vías.
	De segunda	Diámetro aproximado: 5 cm. Usados en concretos y bases de vías.
	De tercera	Diámetro aproximado: 10 cm. Utilizados en el afirmado de pisos.
Gravas	Son agregados que presentan una granulometría menor que los triturados. Se clasifican según su tamaño, así:	
	Gruesa	Diámetro de 1.0 a 2.5 cm. Usada para conformación de base y mezcla asfáltica, en vías y concretos.
	Mediana	Diámetro de 0.7 a 1.0 cm. Empleada para conformación de base y mezcla asfáltica, en vías y concretos.
	Fina	Diámetro de 0.25 a 0.5 cm. Se usa principalmente en la composición de concretos y asfaltos, y también en pisos y fachadas.
Arenas	Es el agregado más utilizado en la construcción, por ejemplo, en morteros de cemento, concreto simple, pañetes, preparación de asfaltos, arenas para vidrios, rellenos en la construcción de vías, etcétera. Se han clasificado en tres tipos:	
	Arenas naturales	Extraídas, clasificadas y utilizadas naturalmente.
	Arenas de río	Extraídas hidráulicamente de ríos, lagos y mares.
	Arenas de trituración	Son aquellas producto de la trituraciónde los agregados gruesos.
Recebos	Se obtienen a partir de arenas de peña, de algunas unidades geológicas que se caracterizan por ser relativamente blandas y ser fácilmente molidas y desmenuzadas. Por lo general, incluyen fracciones arcillosas. Se utilizan en morteros para pañetes, pega de ladrillos, para bases y subbases de vías, afirmado de pisos y en relleno y mejoramiento de terrenos para construcción.	

Fuente: Hernández (1998)

La normativa española de extracción de áridos en la plataforma marina difiere de la de otros países, ya que permite solo la explotación para obras de regeneración de playas y construcción de puertos. En América Latina, Brasil quizá sea el mayor productor de agregados, debido a la alta demanda de estos.

2.5. Recursos, reservas y comercio

Los recursos y reservas de las arenas y gravas a nivel internacional se consideran importantes; sin embargo, no se conocen cifras oficiales de la mayoría de los países. Solo los que cuentan con asociaciones de productores muestran algunas cifras de producción que se pueden considerar de relativa confiabilidad. En Europa se creó el Grupo de Trabajo Internacional sobre Minerales Industriales (Imiwog, por su sigla en inglés), que concluyó que cuando existen estadísticas oficiales, estas difieren entre un 30 y 50 % de los datos reales. Así, se puede establecer que la gran mayoría de los países cuentan con grandes reservas, que han garantizado su propio desarrollo socioeconómico e industrial.

A título ilustrativo se muestra la producción de arenas y gravas para la construcción a nivel mundial durante el año 2016 (figura 6). Se observa que Estados Unidos domina el mercado, pero como se mencionó anteriormente, no se conocen las estadísticas de países como China, Brasil e India, que son grandes consumidores de este tipo de materiales.

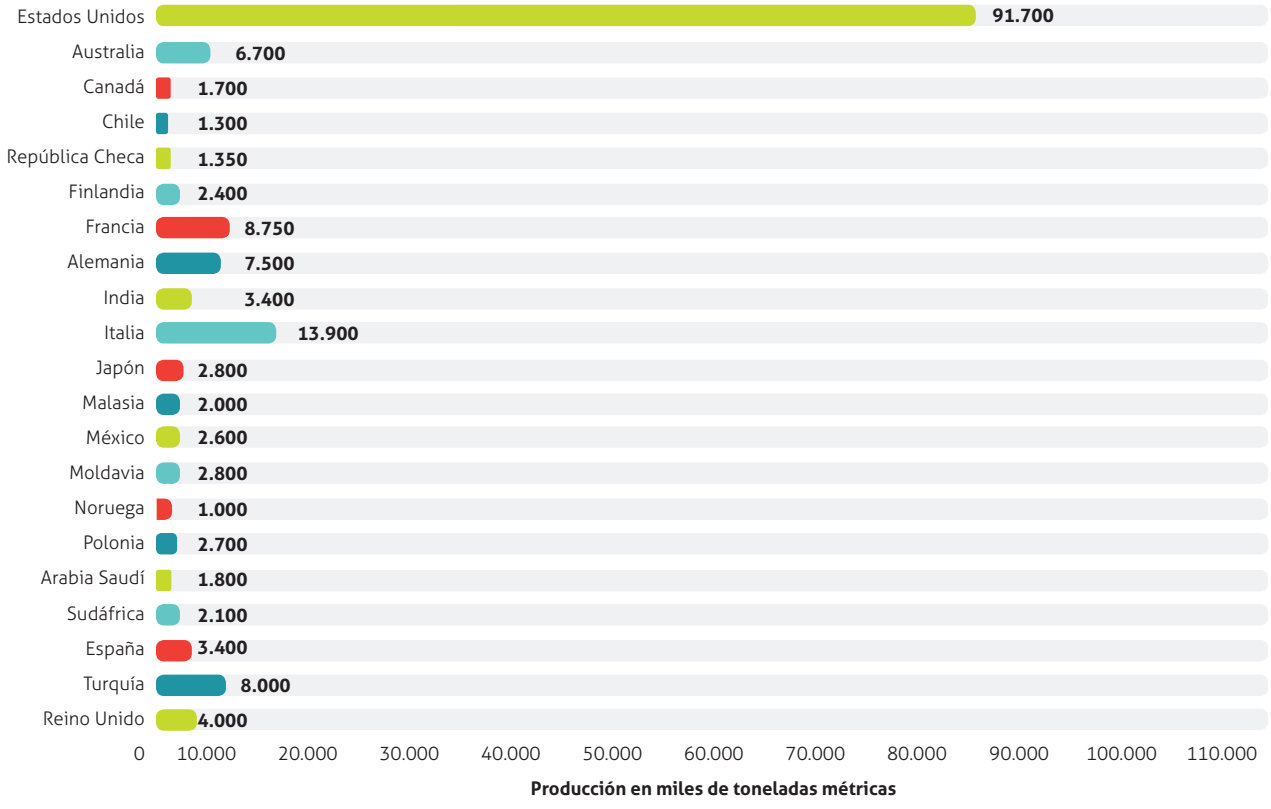


Figura 6. Producción de arenas y gravas durante el año 2016 (en miles de toneladas métricas)

Fuente: Statista (2017)

Vale la pena comentar que existe una relación directa entre el consumo de cementos y el de arenas, gravas y triturados. Mediante la fórmula siguiente se puede calcular esta relación: se dice que el consumo de cemento por 10.7 es igual al consumo de arenas y gravas y triturados, al menos en Estados Unidos. En este orden de ideas, se ha estimado una producción mundial de cemento de 3000 millones de toneladas en el año 2016, con lo cual la demanda de arenas y gravas y triturados es de 32100 millones de toneladas.

Las estadísticas publicadas de producción mundial de áridos o agregados básicamente corresponden a datos específicos, y en general provienen de algunos países del hemisferio occidental. La mayoría, cuando indican cifras de extracción correspondientes a las arenas, gravas y rocas, no diferencian los volúmenes de los áridos (arenas y gravas) usados en la construcción de los que reciben usos industriales y las rocas ornamentales. Los mayores productores de arenas, gravas y triturados son Estados Unidos, Canadá, Alemania, Italia, China, Francia, Inglaterra, Austria, España y Suiza.

Los recursos de arena y grava del mundo son abundantes. Sin embargo, debido a restricciones ambientales, distribución geográfica y requisitos de calidad que rigen en algunos usos, la extracción de arena y gravas no es rentable en ciertos casos. Las fuentes comerciales más importantes de arena y grava han sido depósitos glaciales, los canales de los ríos y las llanuras de inundación de los ríos. En Estados Unidos, el uso de depósitos costa afuera se limita al control de la erosión y reposición. Otros países rutinariamente extraen depósitos de arenas y gravas para adelantar proyectos de construcción (USGS, 2017).

En la actualidad, las reservas mundiales se ven incrementadas por la actividad emergente relacionada con los áridos, y por el tratamiento de los residuos de construcción y demolición. Como ejemplo de la importancia de este tipo de reciclaje vale mencionar que en Alemania se utilizan cerca de 50 millones de toneladas de este tipo de áridos, frente a los 650 millones de toneladas que se requieren para la construcción. En Europa se producen aproximadamente 3000 millones de toneladas de arenas, gravas y áridos que generan unos 200 000 empleos (Regueiro y González, 2004).

Se puede concluir que los mercados de arenas y gravas en la mayoría de los países satisfacen la demanda con la producción local, si bien se nota la tendencia a importar o exportar arenas silíceas, aunque en cantidades relativamente bajas.

Uno de los factores fundamentales es el bajo precio unitario, en comparación con los costos de transporte. Este hecho hace que el comercio exterior de los áridos sea relativamente pequeño, si se compara con los grandes volúmenes de producción y de consumo. En Europa, algunos países efectúan intercambios comerciales de los agregados con las naciones vecinas (Andorra, Portugal, Gibraltar, España, Francia).

2.6. Perspectivas

Según las Naciones Unidas, las ciudades de todo el mundo están creciendo a un ritmo inusitado, el 54 % de la población vive en zonas urbanas y se espera que un 68 % lo haga en 2050. La ONU (Agencia EFE, 2018), señala que la urbanización, unida al crecimiento de la población, añadiría 2500 millones de habitantes a las ciudades para 2050. También indica que en 1990 había 10 megaciudades con más de 10 millones de personas, y se prevé que en 2030 sean 43.

Pero mientras las metrópolis crecen en tamaño y altura, el suministro mundial de recursos naturales está explotado al máximo. Esta explotación no proviene solo del aumento de la demanda de oro, diamantes o cobre, sino de arena, la materia prima de la construcción y, por ende, del desarrollo económico.

El hormigón y el vidrio se componen principalmente de un tipo especial de arena que está bajo la tierra, bajo el agua y en las playas. La minería de arena para atender la creciente demanda se ha transformado en una próspera industria multimillonaria, pero se indica que es insostenible. "La arena y la grava son la materia prima más usada en la tierra después del agua. Su uso excede ampliamente su tasa natural de renovación" PNUMA (2016) y Edwards (2015).

El mayor consumidor de arena y grava es el sector del cemento. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) estima que en 2012 se usaron casi 26 000 millones de toneladas métricas para hormigón, un aumento espectacular frente a los 11 000 millones utilizados en 1994. Los datos del USGS muestran que la producción mundial de cemento se triplicó de 1370 millones de toneladas métricas, en 1994, a 3700 millones en 2012, que el PNUMA (2016), atribuye al rápido crecimiento económico de Asia. "Solo en China se construyeron 90 000 millas de carreteras en 2013 y la demanda de cemento subió un 437.5 % en 20 años", indica el informe.

Mientras el sector de la construcción se esfuerza por encontrar más arena de buena calidad para atender la creciente demanda de vidrio y hormigón, los proveedores enfrentan otro portento: la fracturación hidráulica. Este método no tradicional de extracción del petróleo, también llamado *fracking*, dispara una mezcla de arena y agua dentro de formaciones compactas de petróleo, rompiendo la roca para facilitar la extracción.

Aunque el uso de arena para *fracking* no es nuevo, recientemente se descubrió que la producción de los pozos puede aumentar si se usa más arena. Por ende, en Estados Unidos, el uso total de arena para estos fines se disparó de solo 5 %, en 2003, a 72 % en 2014 (USGS, 2004 y 2015, en Domínguez y Schifter, 1995).

El panorama mundial indica muy buenas perspectivas para las arenas, gravas y materiales de construcción, debido al incremento de la demanda global. El reto es encontrar más depósitos cerca de los centros de desarrollo urbano y de infraestructura.

3. Arenas y gravas en Colombia

3.1. Geología regional

En Colombia, las unidades geológicas que tienen potencial para convertirse en importantes productoras de arenas y gravas están relacionadas con el sistema andino colombiano, dominado por las cordilleras Occidental, Central y Oriental. La condición actual de cinemática y convergencia geométricamente heterogénea, especialmente entre la placa Nazca y la Suramérica, y su evolución a lo largo del tiempo, son las responsables de la intensidad de los procesos tectónicos activos como la subducción, la formación de cordilleras, cuencas y cadenas volcánicas, la reactivación y neoformación de estructuras corticales, así como de una intensa actividad sísmica (Gómez *et al*., 2006).

En este proceso, en lo que respecta a las arenas y gravas sobresale la cordillera Oriental, constituida en su mayor parte por rocas clásticas y bioclásticas, y en menor proporción por cuerpos cristalinos y metamórficos. En la sucesión de unidades estratigráficas que constituyen los depósitos de mayor interés económico para la obtención de arenas y gravas se encuentran algunas formaciones de los períodos Cretáceo, Terciario y Cuaternario.

La cordillera Occidental está conformada en su mayoría por rocas volcánicas y metamórficas que subyacen a sedimentitas del Neógeno, como las formaciones Guachinte, Ferreira y Esmita. El miembro La Cima de la Formación Guachinte, constituido desde arenitas finas hasta conglomeráticas de cuarzo, con un espesor de 100 a 150 m, aflora a lo largo de los departamentos del Cauca y Valle del

Cauca, conformando una fuente apta para la explotación de arenas y gravas. La formación Ferreira, en el miembro Suárez, y la formación Esmita, predominantemente arenosas y conglomeráticas, pueden ser de interés por la existencia de estos materiales.

Desde el punto de vista geológico, 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 inferior de esta unidad se convierte en una fuente potencial para la extracción de arenas y gravas silíceas. El batolito Antioqueño, del Cretáceo tardío, está asociado a la subprovincia metalogénica denominada Antioquia-Samaná (Salinas, Rodríguez, Lozano y Solano, 1999); el *stock* de Amagá y el neis de La Miel constituyen fuentes de arenas finas.

La cordillera Oriental, desde el Huila, hasta Norte de Santander, muestra un dominio geológico de unidades sedimentarias datables desde el Paleozoico hasta el Neógeno, que incluye depósitos cuaternarios. Hacia el sur y parte central de la cordillera afloran las formaciones Areniscas de Cáqueza, Caballos, Une y Grupo Guadalupe, relacionadas con el Cretáceo Inferior y Superior, y las formaciones Cacho y Socha, inferior del Paleógeno; hacia el norte, sus equivalentes, las formaciones Río Negro, Aguardiente, Barco y Mirador constituyen una fuente gigantesca de arenas, gravas y agregados pétreos, útiles en general como materiales de la construcción, que pueden explotarse.

En Colombia, la mayoría de las fuentes extractivas de arenas y gravas están asociadas a depósitos no consolidados, y algunas a los estratificados y por meteorización (macizos arenosos). En lo que respecta a los no consolidados, corresponden a los sedimentos cuaternarios, representados por terrazas, abanicos aluviales, conos de deyección, de playa, glaciales, derrubios o coluvios, ríos meandriformes, ríos trenzados, cauces actuales y brechas de falla.

3.2. Geología local

Vale la pena mencionar que el país ha sido subdividido en seis provincias metalogénicas que agrupan parámetros metalogénicos en función de la relación espacio-tiempo-mineralización, representados en la segunda versión del mapa metalogénico de Colombia, a escala 1:1 500 000. En ese mapa se muestra además la distribución de asociaciones de provincias y subprovincias de depósitos minerales, distritos y yacimientos localizados, así como su relación con hechos geológicos y tectónicos. Las provincias se definieron con los nombres de las provincias metalogénicas Oceánica Occidental, Cauca Romeral, Continental Central, Continental Oriental, Sierra Nevada y Escudo Guayanés (Salinas *et al.*, 1999).

A pesar de que las arenas, gravas y triturados no están directamente relacionados con estos eventos de mineralización, son el resultado de la erosión y transporte a partir de las rocas que constituyen en general estas provincias metalogénicas.

Ahora bien, en atención a la clasificación propuesta por la UPME (2005), que con base en términos de reservas, producción y mercado de destino formuló veintiséis distritos mineros que agrupan los diferentes depósitos minerales de Colombia, en el presente trabajo se seguirán en lo posible estos lineamientos en lo relativo a los materiales de construcción (arenas y gravas). La categorización propuesta tiene este orden:

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

De acuerdo con esta clasificación, es posible afirmar que en Colombia todos los distritos relacionados con los materiales de construcción, específicamente arenas y gravas, están ubicados en el grupo II.

A continuación se hace una descripción de los distritos más importantes donde se realiza extracción de arenas y gravas.

3.2.1. Distrito minero de la Sabana de Bogotá

Geográficamente, el distrito minero Sabana de Bogotá se encuentra localizado en la parte central de la cordillera oriental, y presenta los siguientes límites naturales: por el este, los cerros orientales que cursan en dirección NNE, desde el sur de Bogotá hasta más al norte de Villapinzón; por el oeste, un cordón montañoso que separa la altiplanicie de la vertiente del valle medio del río Magdalena; por el sur, el páramo de Sumapaz, y por el norte, la cuenca alta del río Bogotá. Este distrito cuenta con importantes vías de comunicación, como la carretera Central del Norte, que lo comunica con Tunja. Las carreteras del suroccidente y noroccidente lo comunican con Girardot, Ibagué y Neiva, y con Honda-Medellín, respectivamente. La vía al Llano lo

comunica con Villavicencio; cuenta, además, con numerosas vías de penetración.

Por otra parte, como distrito minero, incluye las zonas de actividad minera localizadas tanto en el distrito capital de Bogotá como en los municipios vecinos de Bojacá, Chía, Gachancipá, Guasca, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque, Tabio, Tenjo y Tocancipá. Vale la pena señalar que los departamentos del Meta y Tolima aportan al mercado de la sabana de Bogotá entre 80 000 y 100 000 metros cúbicos anuales de gravilla (González, Cárdenas y Parrado, 2001). Asimismo, se llevan a cabo algunas explotaciones de arenas y gravas entre las localidades de Guaduas y Honda.

Geológicamente, en el área del distrito minero Sabana de Bogotá afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades que van desde el Cretáceo superior hasta el Cuaternario. Se denominan, de más antigua a más reciente, formaciones Chipaque, La Frontera, Simijaca y Conejo (edad Turoniano-Santoniano), originadas por sedimentación de ambientes marinos. A partir del periodo Campaniano, la sedimentación se dio en zonas distales con las formaciones Lidita Superior y Arenisca Dura, en zonas poximales, y en el Campaniano Superior con la formación Pleaners. El último registro marino corresponde a la formación Labor y Tierna, y la parte inferior de la formación Guaduas. La sedimentación de origen fluvial en el Paleógeno y Neógeno generó las formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y Tilatá. Durante el Mioceno, con una tectónica activa, que afectó las formaciones antes depositadas, y al parecer quedan registros tales como las formaciones Chorrera y Marichuela. Posteriormente se dio el relleno con las formaciones Subachoque, Río Tunjuelito y Sabana, seguidas de eventos de glaciación que generaron los depósitos de las formaciones Siecha y Chisacá (Montoya y Reyes, 2007).

La figura 7 ilustra el área de influencia de este distrito.

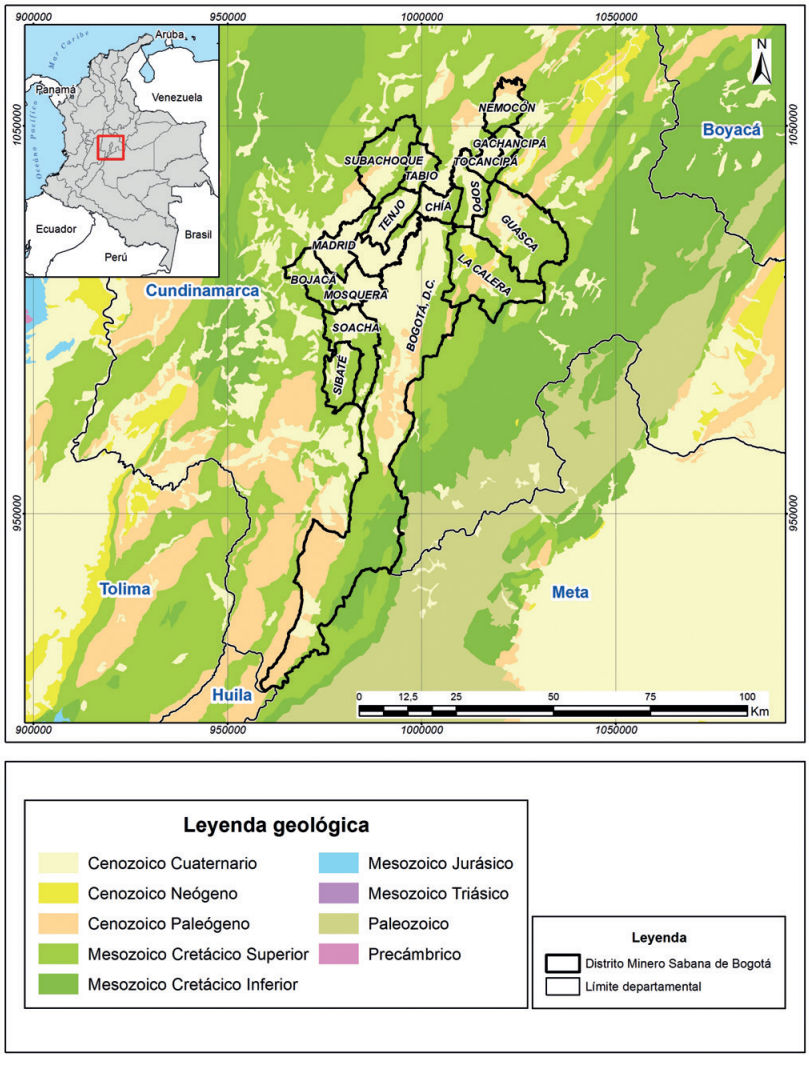


Figura 7. Distrito minero Sabana de Bogotá

Fuente: UPME (2005)

Los estratos consolidados están afectados, en el ámbito local, por esfuerzos tectónicos, generalmente expresados por fallas de tipo inverso; una de las más representativas es la falla Bogotá, que superpone los estratos del Cretáceo a los del Terciario. Estos esfuerzos ocasionan pliegues sinclinales amplios y anticlinales relativamente estrechos, donde los flancos orientales de los sinclinales se manifiestan desde muy inclinados a localmente inversos.

La formación Arenisca Dura es una fuente importante de agregados para concreto y asfaltos. Las arenas son extraídas de las formaciones Tierna, Cacho, Regadera y Tilatá, y se localizan en el flanco occidental del sinclinal de Checua, donde se explotan arenas de la formación Cacho en al menos nueve canteras; en los alrededores de Chocontá y Villapinzón, en dieciséis canteras de la formación Tilatá, y en tres de la formación Regadera; al oriente del municipio de Gachancipá, sobre la formación Arenisca Tierna, se explota en diecinueve canteras, y al suroccidente de Bogotá, en el sector de Mondoñedo (formación Tierna) y Sibaté-Soacha (formación Tierna y Arenisca La Guía de la formación Guaduas). Las formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna son productoras de arena de peña, y la última, además, produce arenas para vidrio. Las formaciones Cacho y Regadera (nivel arenoso) son fuentes de material para concretos, y los estratos de Usme, para arenas. Los depósitos cuaternarios producen principalmente gravas en las formaciones Subachoque y Tunjuelito; la formación Tilatá contiene gravas de un diámetro que oscila entre 2 y 6 cm; al occidente de Chocontá se estimó un espesor de 80 m. Estos depósitos afloran principalmente en el núcleo del sinclinal de Río Frío, Guasca y al sur de Bogotá (González *et al.*, 2001; Montoya y Reyes, 2007).

Los materiales de construcción son imprescindibles para el desarrollo de la ciudad de Bogotá, y como no es posible detener el incremento de sus precios mediante la racionalización o el control de la demanda, una alternativa real para modificar esta situación es incentivar la oferta procedente de fuentes localizadas a distancias menores de las que actualmente abastecen este mercado. Gran parte de esta tarea está en manos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que ha de redefinir algunas normas para facilitar la actividad minera al tiempo que se defiende el medio ambiente.

En las tablas 10 y 11 se destaca, en el departamento de Cundinamarca, incluido el distrito capital, una producción de arena de 975 827.260 m^3 y 1 894 291.86 m^3 de grava en el año 2017, según reporta la Agencia Nacional Minera en un documento publicado en febrero de 2018 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

Tabla 10. Producción de arena en el departamento de Cundinamarca (2017)

Municipio	Producción en 2017 (m^3)
Bojacá	
Caparrapí	
Cáqueza	
Carmen de Carupa	
Chía	
Cogua	
Cucunuba	
El Rosal	
Fusagasugá	
Gachetá	
Guaduas	
Guataquí	
Guayabetal	
Jerusalén	
Junín	
Madrid	975 827.260
Medina	
Mosquera	
Nariño	
Nilo	
Quetame	
Ricaurte	
San Juan de Río Seco	
Soacha	
Tabio	
Tausa	
Tocancipá	
Une	
Útica	
Villeta	
Bogotá, D. C.	

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

Tabla 11. Producción de grava en el departamento de Cundinamarca (2017)

Municipio	Producción en 2017 (m^3)
Anapoima	
Cajicá	
Caparrapí	
Cáqueza	
Carmen de Carupa	
Chaguaní	
Chía	
Cogua	
El Colegio	
El Rosal	
Fosca	
Gachetá	
Guaduas	
Guataquí	
Guayabetal	
Jerusalén	
Junín	
Madrid	
Manta	
Medina	1 894 291.86
Mosquera	
Nariño	
Nilo	
Paratebueno	
Quetame	
Ricaurte	
San Cayetano	
San Juan de Río Seco	
Silvania	
Soacha	
Subachoque	
Tabio	
Tibirita	
Tocaima	
Tocancipá	
Une	
Útica	
Villeta	
Bogotá, D. C.	

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.2. Distrito minero Amagá-Medellín

En Antioquia, la mayor fuente de arenas y gravas está localizada en el suroccidente, en el área de influencia de Medellín y Amagá. Geológicamente, se establece que estos depósitos están asociados con anfibolitas que afloran al norte de Medellín, sedimentitas de la Formación Amagá, de edad Paleógeno, y aluviones recientes. Las principales localidades de este distrito se comunican con el área metropolitana de Medellín por la troncal del Café y la carretera que conduce a Amagá, Fredonia, Venecia y Bolombolo. Esta área se encuentra cruzada por numerosas carreteras de penetración (figura 8).

La formación Amagá está dividida en tres niveles, de los cuales el nivel inferior, con un espesor promedio de 200 m, se considera fuente potencial de arenas y gravas. Está constituido básicamente por niveles de conglomerados líticos de magmáticas y metamorfitas a la base; los suprayacen niveles de conglomerados y arenitas de grano grueso de cuarzo. Algunos niveles de arenitas arcillosas se encuentran intercalados. En esta unidad se han hecho ensayos para una muestra, que indican granulometrías de mortero con calidad defectuosa por su alto contenido de terrones de arcilla, partículas deleznables y livianas que están por fuera de la norma NTC 2240. Sin embargo, es conveniente continuar con su caracterización (Maya, 2003).

La formación Combia incluye niveles de rocas conglomeráticas constituidas por cantos redondeados de rocas porfídicas, areniscas y arcillolitas en matriz arenosa, con elevado contenido de granos finos de cuarzo, que se pueden usar en la producción de cementos. Cabe anotar que por cambios de facies, en algunos sitios a lo largo y ancho de esta unidad se encuentran cantos de andesita, con contenidos de sílice amorfa que podría reaccionar con los álcalis del cemento. Es deseable, por tanto, caracterizarla para esta reacción.

Entre los depósitos inconsolidados, Maya, refiere depósitos en Santa Fe de Antioquia, sector de Bolombolo, San Pedro de Belmira y el valle de Aburrá.

Los de Santa Fe de Antioquia están relacionados con el río Cauca, con sus afluentes, los ríos Aburrá y Tonusco, y las quebradas Seca y La Sopetrana. Aquí se presentan depósitos de arenas y gravas asociadas con terrazas aluviales, llanuras de inundación, cauces de ríos y depósitos de derrubio. Los depósitos de Bolombolo corresponden a llanuras de inundación y a cauces de los ríos Cauca y Sinifaná. Los de San Pedro de Belmira, a depósitos de terrazas aluviales en las márgenes del río Chico, que cursa cerca de las localidades antes mencionadas (Maya, 2003).

El depósito del valle del Aburrá se constituye en el más importante para la extracción de arenas y gravas. Todo el material producido se consume en el área metropolitana

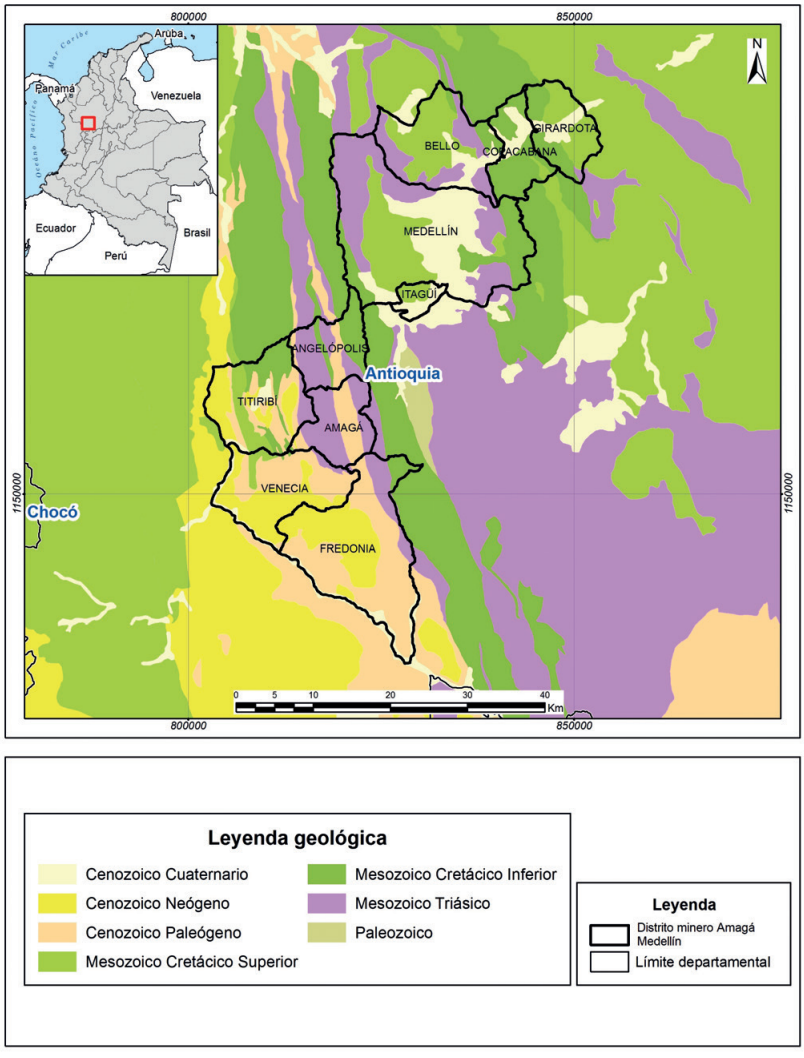


Figura 8. Distrito minero Amagá-Medellín
Fuente: UPME (2005)

de Medellín, y se usa tanto para la fabricación de concreto como en mezclas de asfalto. En este sector del valle del Aburrá, desde Caldas hasta Barbosa, existen más de cuarenta explotaciones en las que se extraen materiales de construcción; además, hay otros centros de abastecimiento, localizados en municipios relativamente cercanos a Medellín, como Abejorral, Angelópolis, El Carmen de Viboral, Heliconia, Sopetrán, Rionegro, Montebello, Titiribí, Fredonia y Venecia (Gobernación de Antioquia, 2005).

En primer término, se extraen arenas silíceas del miembro superior de la formación Amagá, en los municipios de Amagá, Angelópolis y Titiribí; igualmente, en el municipio de Amalfi se explotan algunos conglomerados y areniscas poco consolidadas. En segundo lugar, en los municipios de El Retiro, Guarne y Bello, y en el corregimiento Santa Elena, jurisdicción de Medellín, se han extraído bloques de cuarzo lechoso, provenientes de venas y filones presentes en rocas metamórficas e ígneas de carácter intrusivo. Los de la formación Amagá, y los conglomerados de Amalfi, se usan por lo regular para la fabricación de vidrio, filtros, en fundición y elaboración de ladrillos silíceos; los segundos, en aplicaciones para abrasivos, jabones, asfaltos y rellenos de pinturas.

Como fuente potencial para arenas se mencionan los depósitos de macizos arenosos, acumulaciones que se han formado por meteorización a partir de rocas ígneas tipo granito, y metamórficas de origen ígneo. En Antioquia, el *stock* de Amagá, el neis de La Miel y el batolito Antioqueño constituyen en depósitos importantes que se explotan como areneras para obtener arena fina. Vale la pena mencionar que el material derivado de estas rocas puede contener partículas livianas, como micas, que están en el límite cercano o superior al permitido para la elaboración de concreto y como agregado en mampostería (Maya, 2003).

Las rocas ígneas se consideran una fuente importante para la obtención de piedra triturada. En Antioquia afloran cuerpos compuestos de granito, granodiorita, cuarzodiorita, dacita, basalto, andesita y diabasa, entre muchos otros. Los depósitos de este tipo de rocas se clasifican, de acuerdo con su calidad física y química, así:

- Material de muy buena calidad: son rocas hipoabisales porfídicas localizadas en los municipios de Titiribí-Angelópolis, La Pintada-Valparaíso-Caramanta, a lo largo de la depresión del río Cauca.
- Material aceptable (álcali-sílice): estos materiales se encuentran en las unidades rocosas denominadas *basaltos de Barroso*, en el suroeste antioqueño, complejo Quebradagrande y formación Combia.
- Material aceptable nocivo (partículas livianas): se encuentra en unidades de roca como el batolito Antioqueño, el *stock* de Altavista, el *stock* de Cambumbia, diorita de Heliconia, diorita de Pueblito, batolito de Sabanalarga, ultramáficos y dunitas de Medellín.
- Material pobre nocivo (partículas livianas): conformado por la unidad rocosa *stock* de Amagá.
- Material pobre inofensivo: se encuentra en las unidades de roca denominadas gabro de Romeral y gabro de Hispania.

En cuanto a las rocas metamórficas, se caracterizan porque presentan foliación planar, causada por la cristalización de minerales tipo micas. Algunos posibles depósitos de este tipo se clasifican, por su calidad física y química, así:

- Material aceptable nocivo (álcali-sílice y partícula liviana): su calidad física es aceptable pero químicamente nociva por la potencialidad en la reacción álcali-sílice, y además por la presencia de partículas livianas. Está representado por el neis de Palmitas, granulitas y migmatitas El Retiro (Maya, 2003).
- Material pobre nocivo (partícula liviana): se encuentran depósitos en las unidades de roca denominadas anfibolitas de Medellín y anfibolitas de Sucre (Santa Fe de Antioquia-Sopetrán) (Maya, 2003).
- Agregados livianos: provienen de agregados naturales como piedra pómez o escoria, y los agregados procesados obtenidos por procesos de peletización, sinterización o expansión de productos de alto horno. Las rocas más comunes donde se encuentra este tipo de material son las rocas metamórficas tipo esquistos y metasedimentos. Se encuentran depósitos potenciales de agregados livianos en el complejo Cajamarca, complejo Arquía y metasedimentitas de Sinifaná (Maya, 2003).

La demanda de materiales de construcción está condicionada básicamente por la necesidad de la industria del sector de la construcción, tanto en obras de infraestructura como en viviendas y edificios urbanos.

En la tabla 12 se reporta, del departamento de Antioquia, una producción de arena de 13 526 m^3 y 203 668.96 m^3 de grava en el año 2017, según reporta la Agencia Nacional Minera en un documento publicado en febrero de 2018 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

Tabla 12. Producción de arena y grava en el departamento de Antioquia (2017)

Municipio	Producción en 2017 (m^3)	
Don Matías	Arena	13 526.00
Yondó		
Medellín	Grava	203 668.96
Carepa		
Don Matías		
Girardota		
Titiribí		
Turbo		

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.3. Distrito minero de Ataco-Payandé

Este distrito está ubicado en el departamento del Tolima, cuya capital es la ciudad de Ibagué. Su principal vía vehicular es la carretera Central, totalmente pavimentada, de la cual se desprenden otras vías secundarias que llegan a los centros de producción de arenas y gravas, que a su vez facilitan el transporte de material de consumo local, así como de otros departamentos. Los municipios productores son Coello, Carmen de Apicalá, Guamo, Espinal e Ibagué (figura 9).

Por su ubicación espacial y procesos geomorfológicos y estructurales que le han dado origen, el área comprende tres provincias fisiográficas contrastantes —la cordillera Central, la cordillera Oriental y el valle del Magdalena— donde afloran rocas de interés para obtener estos materiales.

Las unidades geológicas productoras de materiales de construcción corresponden a rocas del Cretáceo y Terciario. Entre estas sobresale la formación Gualanday, de edad Neógena, constituida por areniscas y conglomerados silicios (chert), que afloran cerca del Carmen de Apicalá. Asimismo, las formaciones La Tabla y Guadalupe, del valle superior del Magdalena, constituidas en esencial por arenitas y conglomerados de cuarzo, tienen un gran potencial para producir arenas y agregados pétreos, sobre todo en jurisdicción de los municipios de Ortega, Chaparral y San Luis. Además, otra fuente para estos materiales son rocas volcánicas y aluviones recientes.

En la tabla 13 se reporta, del departamento del Tolima, una producción de arena de 714 997.22 m^3 y 576 279.51 m^3 de grava en el año 2017, según reporta la Agencia Nacional Minera en un documento publicado en febrero de 2018 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

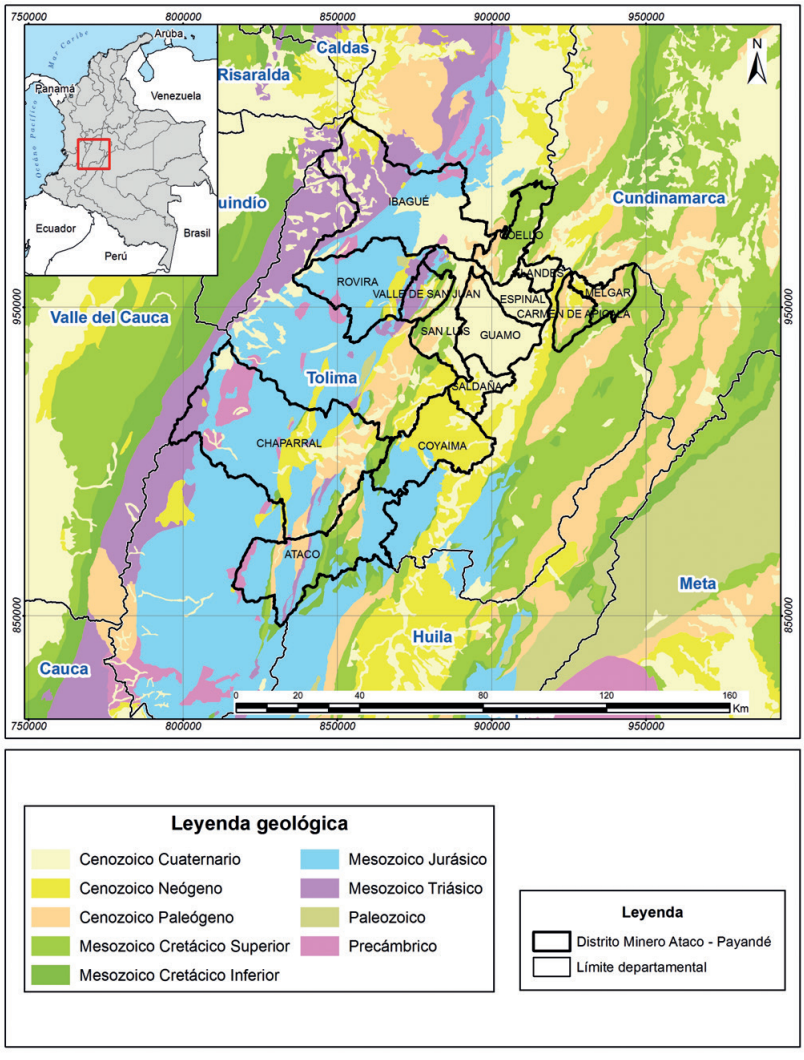


Figura 9. Distrito minero Ataco-Payandé

Fuente: UPME (2005)

Tabla 13. Producción de arena y grava en el departamento del Tolima (2017)

Municipio	Producción en 2017 (m^3)		Municipio	Producción en 2017 (m^3)	
Ibagué	**Arena**	714 997.22	Ibagué	**Grava**	576 279.51
Alvarado			Alvarado		
Carmen de Apicalá			Armero		
Coello			Carmen de Apicalá		
Coyaima			Chaparral		
Espinal			Coello		
Flandes			Coyaima		
Guamo			Espinal		
Honda			Flandes		
Melgar			Guamo		
Ortega			Honda		
Saldaña			Melgar		
San Luis			Ortega		
Suárez			Saldaña		
			San Luis		
			Suárez		
			Valle de San Juan		

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.4. Distrito minero Luruaco

Se ubica en la costa caribe colombiana, a la altura de los departamentos del Atlántico y Bolívar. Se ha establecido que la mayoría de los depósitos para arenas y gravas corresponden a sedimentos recientes de tipo fluvial y marino. Este distrito abarca no solo la actividad minera relacionada con materiales de construcción, sino también con calizas y arcillas en los municipios de Luruaco, Repelón y Puerto Colombia, en el Atlántico, y en los municipios de Turbaná, Turbaco, Arjona y Cartagena, en el departamento de Bolívar. El distrito cuenta con buenas vías de comunicación, como la carretera marginal de la Costa, que une a La Guajira con Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, y con carreteras secundarias óptimas para el transporte. Posteriormente se mostrará el área de influencia del distrito (figura 10).

La fuente principal para la obtención de arenas y gravas en el área de influencia del distrito corresponde en general a depósitos sedimentarios recientes de tipo fluvial y marino. Una parte de la producción se origina en la trituración de algunas calizas.

En la tabla 14 se reporta, de los departamentos de Atlántico y Bolívar, una producción de arena de 345 926.20 m^3 y 321 303.70 m^3 de grava en el año 2017, según reporta la Agencia Nacional Minera en un documento publicado en febrero de 2018 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

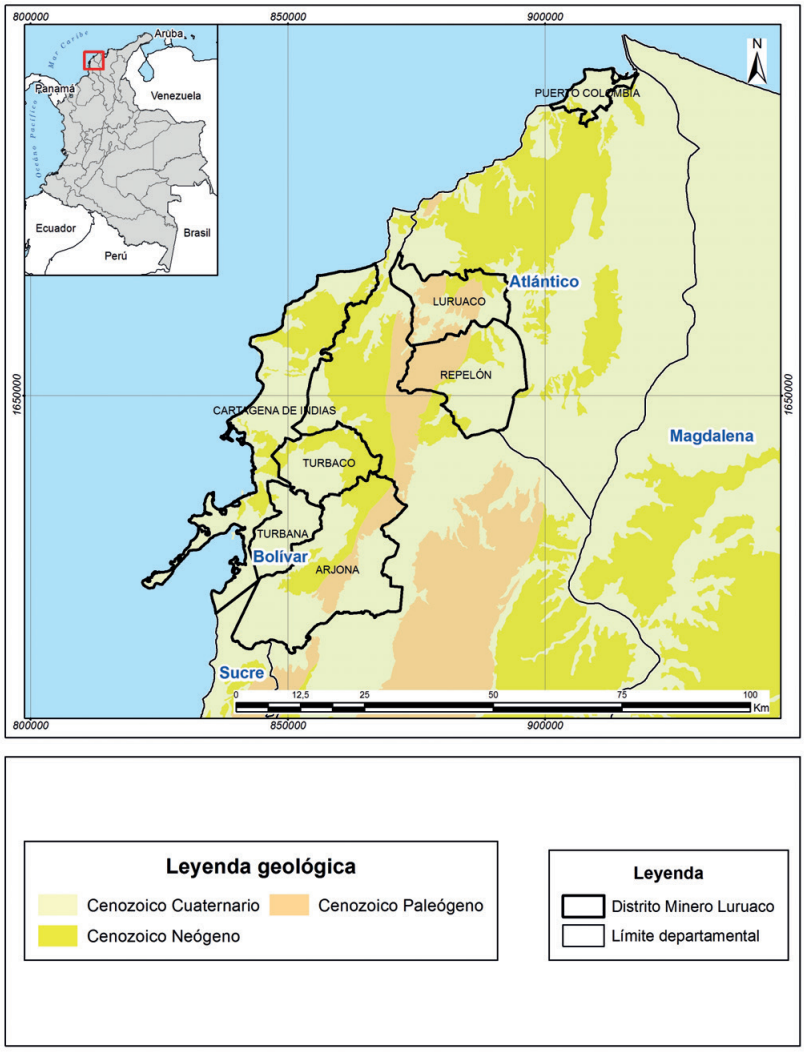


Figura 10. Distrito minero Luruaco

Fuente: UPME (2005)

Tabla 14. Producción de arena y grava en los departamentos de Atlántico y Bolívar (2017)

Departamento	Municipio	Producción en 2017 (m^3)	
Atlántico	Luruaco	Arena	345 926.20
	Malambo		
	Puerto Colombia		
	Repelón		
	Sabanagrande		
	Santo Tomás		
Bolívar	Cartagena		
	Turbaco		
Atlántico	Juan de Acosta	Grava	321 303.70
	Luruaco		
	Repelón		
Bolívar	Cartagena		
	Mahates		
	María la Baja		
	Turbaco		

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.5. Distrito minero El Tambo-El Dovio

El distrito comprende las zonas de actividad minera en el departamento del Cauca, municipios de El Tambo, Puerto Tejada y Suárez, y en el departamento del Valle del Cauca, los municipios de Bolívar, Buenaventura, Buga, Bugalagrande, Caicedonia, Cali, Candelaria, El Dovio, Guacarí, Ginebra, Jamundí, Sevilla, Yumbo y Vijes. Todos estos municipios están comunicados por la carretera Panamericana, mediante vías secundarias en buenas condiciones para el tránsito vehicular. La mayoría de las explotaciones producen arenas silíceas, así como recebos y triturados. De este distrito se extraen además importantes volúmenes de caliza y, en menor escala, carbón, bentonita, magnesita y feldespato (figura 11).

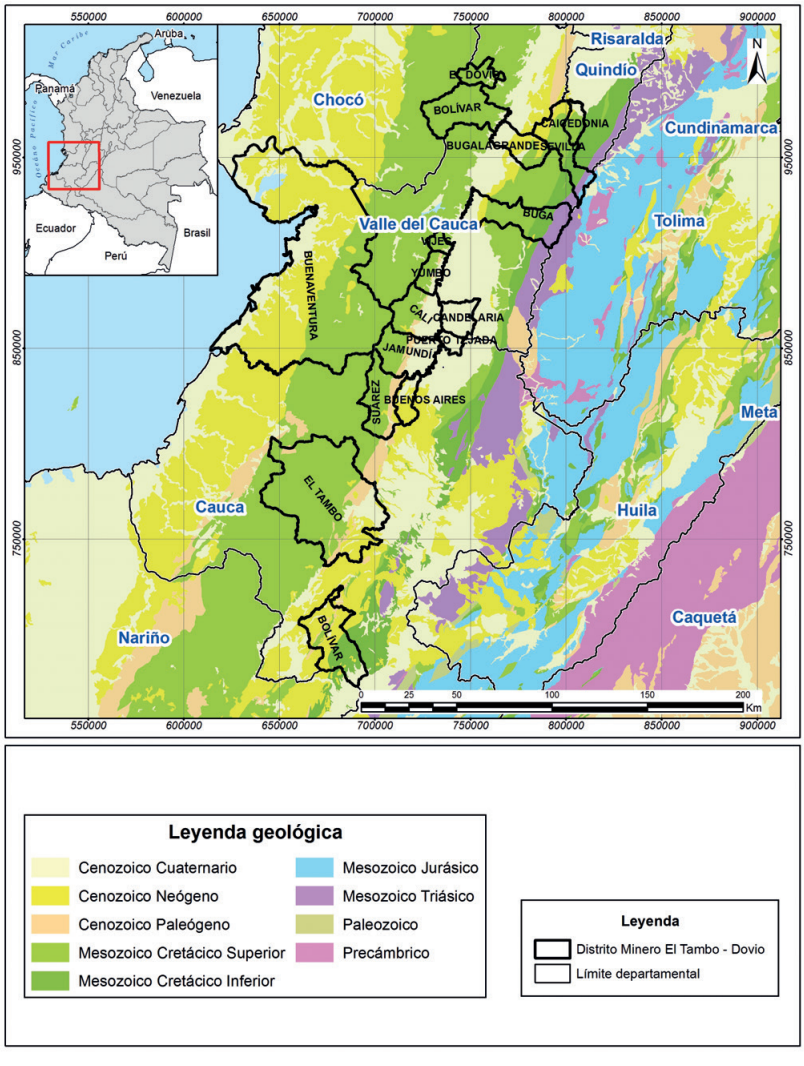


Figura 11. Distrito minero El Tambo-El Dovio

Fuente: UPME (2005)

Con respecto a los materiales de construcción, se reportan como fuentes principales para la producción de agregados pétreos los cuerpos ígneos que afloran en la cordillera Central y en la Occidental. En Ingeominas (1994-2002), en el mapa de actividad minera se puede apreciar que la mayor parte de las explotaciones están asociadas a depósitos aluviales. Algunas extracciones se relacionan con material de arrastre, del que se obtienen arenas silíceas.

En la tabla 15 se reporta, de los departamentos de Cauca y Valle del Cauca, una producción de arena de 164 868.33 m^3 y 368 631 m^3 de grava en el año 2017, según reporta la Agencia Nacional Minera en un documento publicado en febrero de 2018 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

Tabla 15. Producción de arena y grava en los departamentos de Cauca y Valle del Cauca (2017)

Departamento	Municipio	Producción en 2017 (m^3)	
Valle del Cauca	Cali	Arena	164 868.33
	Ansermanuevo		
	Buenaventura		
	Bugalagrande		
	Caicedonia		
	Cartago		
	Jamundí		
	La Victoria		
	Obando		
	Palmira		
	Roldanillo		
	Tuluá		
	Vijes		
	Yotoco		
	Yumbo		
Cauca	Popayán	Grava	17 900.00
	Balboa		
	Bolívar		
	Buenos Aires		
	Corinto		
	Guachené		
	Mercaderes		
	Rosas		
	Totoró		
Valle del Cauca	Cali		250 731.29
	Ansermanuevo		
	Buenaventura		
	Bugalagrande		
	Caicedonia		
	Cartago		
	Jamundí		
	La Victoria		
	Palmira		
	Riofrío		
	Yumbo		

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.2.6. Otras áreas de interés para arenas y gravas

Hay que señalar que la UPME (2005), en su agrupación por distritos, no considera algunas áreas del país donde también se desarrolla la actividad de extracción de arenas y gravas. Para este efecto se partió de la información de los mapas de actividad minera de Ingeominas (1994-2002). De sur a norte se mencionan brevemente los principales sitios donde se desarrolla esta actividad.

Al sur, en el departamento del Putumayo, existen hacia el oeste de la ciudad de Mocoa esporádicas minas donde se extraen arenas, especialmente de depósitos aluviales; mientras que al norte, en el departamento de Risaralda, se presenta una gran actividad minera de materiales de construcción, cerca de Pereira, Marsella y al oeste de Santa Rosa de Viterbo. La mayoría extrae material de recebo. En el departamento del Quindío se explotan igualmente arenas, gravas, recebos y arenas silíceas, en particular cerca de los municipios de Barragán, Córdoba, Calarcá y Salento, a partir de depósitos cuaternarios.

El departamento del Meta produce arena y grava en cantidad suficiente para el consumo interno y para enviar parte de esta producción al distrito Sabana de Bogotá. Por otra parte, en el departamento del Huila existen varias canteras dedicadas a la extracción de arenas, la mayoría en los alrededores de Neiva y algunas pocas hacia Pitalito, La Plata y San Agustín (Ingeominas, 1994-2002).

El departamento de Santander cuenta con varias explotaciones de arenas y gravas en los alrededores de Bucaramanga, Girón y Floridablanca, donde se aprovecha el material que constituye la Terraza de Bucaramanga; en el área de Sabana de Torres existen canteras de las que se extraen arenas silíceas utilizadas en la fabricación de vidrio; en jurisdicción del municipio de San Gil existen explotaciones de arenas, y también sobre el río Manco, donde se explota material de arrastre.

En Norte de Santander hay intensa minería de arenas silíceas cerca de Cúcuta; hacia Chinácota existen algunas canteras de las que se extraen arenas y arenas silíceas. La mayor explotación, en esta última localidad, es de calizas. Al norte de la localidad de Silos, pequeñas explotaciones de gravas; en los alrededores de Ocaña igualmente se extraen arenas silíceas, y en ciertas canteras se explotan arenas (Ingeominas, 1994-2002).

En el norte de Colombia existen, además, algunas explotaciones de arenas, por ejemplo, al sureste de Santa Marta y sobre la carretera a Riohacha, en cercanías de Bocas de Don Diego, donde se extraen arenas y cuarzo; sobre el río Aracataca, cerca de la carretera central del norte, hay algunas areneras que explotan depósitos aluvia-

les. En La Guajira, en los alrededores de Barbacoas, hay extracción de arenas.

En Córdoba, en los alrededores de Sahagún, se extraen arenas y gravas; en Montería y en la Ye se explotan algunas minas de arenas. En general, todas estas explotaciones están asociadas a depósitos de ríos (Ingeominas, 1994-2002). En la figura 12 se puede observar la localización aproximada de algunas manifestaciones de interés en Colombia.

La producción de arenas y gravas del resto de departamentos productores fueron reportadas por la Agencia Nacional de Minería en el año 2017, y se detallan en la tabla 16 (Agencia Nacional de Minería, 2018).

Tabla 16. Producción de arena y grava en otras áreas de interés (2017)

Departamento	Producción en 2017 (m^3)		Departamento	Producción en 2017 (m^3)	
Boyacá	Gravas	160 879.83	Arauca	Arenas	10 385.00
Caldas		161 252.65	Boyacá		79 402.60
Caquetá		23 554.19	Caldas		120 137.59
Casanare		532 798.60	Caquetá		21 184.39
Cesar		389 680.71	Casanare		44 595.00
Chocó		1193.00	Cesar		45 757.80
Córdoba		215 279.00	Chocó		63 609.75
Guaviare		5697.00	Córdoba		41 432.10
Huila		259 183.45	Huila		131 589.75
La Guajira		548 403.90	La Guajira		190 917.50
Magdalena		296 238.92	Magdalena		43 906.96
Meta		704 600.26	Meta		231 347.93
Nariño		94 562.50	Nariño		52 014.00
Norte de Santander		291 713.72	Norte de Santander		12 394.50
Putumayo		7298.00	Quindío		8 696.00
Quindío		228 905.00	Risaralda		33 810.00
Risaralda		322 961.48	Santander		119 716.89
Santander		490 442.35			
Vichada		2860.00			
	Total	**4 737 504.56**		**Total**	**1 250 897.760**

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

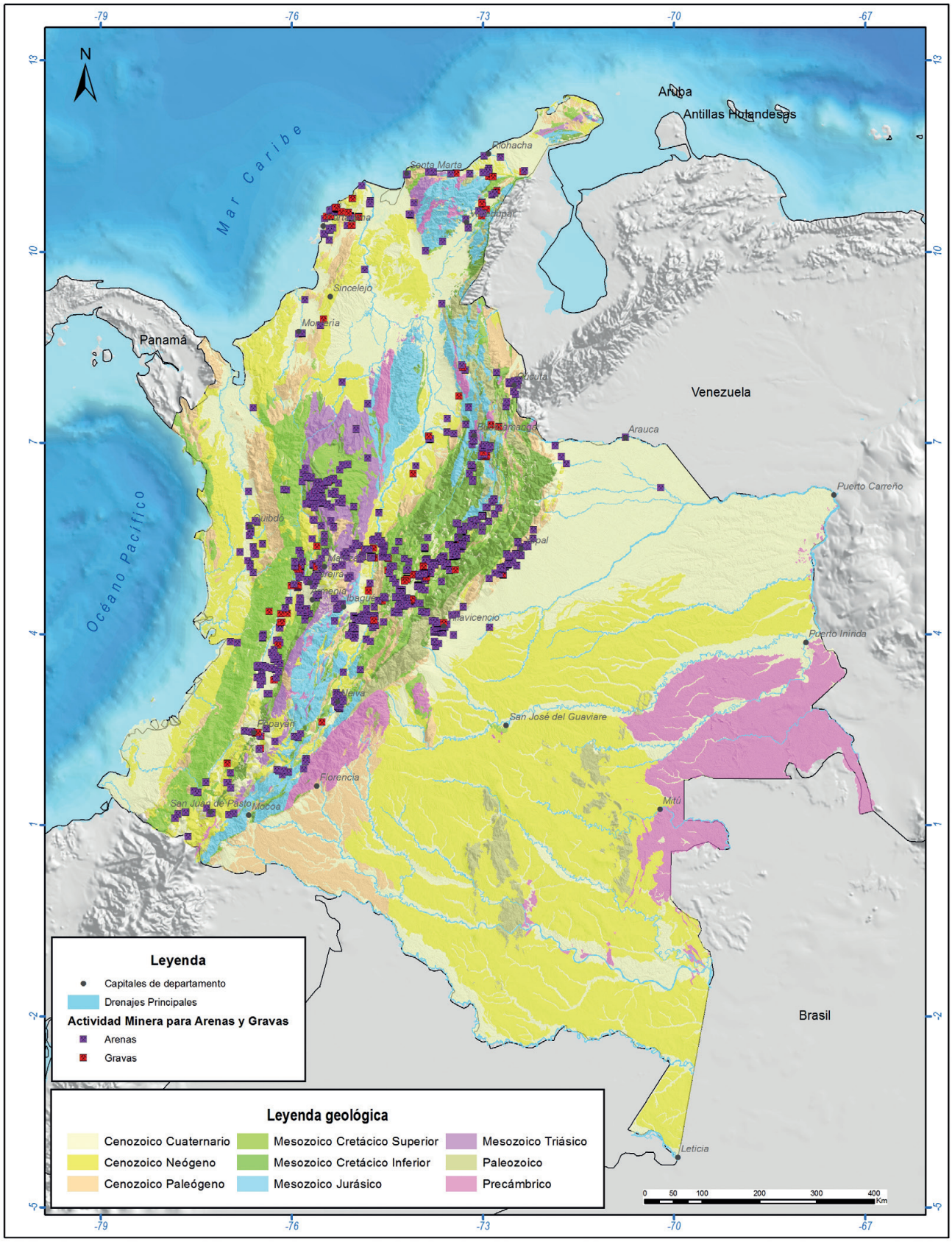


Figura 12. Actividad minera de arenas y gravas en Colombia

Fuente: Ingeominas (1994-2002)

3.4. Situación actual de la minería

Actualmente, el 40% de los títulos mineros que posee el país pertenecen a la operación extractiva de los materiales para la construcción en los que sobresale la producción de grava, arena, asfaltita, diabasa y recebo (Mundo Minero, 2017).

El sistema de explotación que usan muchas de las minas de mayor tamaño, ubicadas en la parte andina del país, es el denominado *método a cielo abierto*, y las explotaciones de menor dimensión utilizan el método de retrollenado.

El sistema a cielo abierto permite alcanzar profundidades de explotación que exceden los30 m, con pendientes últimas por encima de los 50°; esto se debe a la conformación de bancos, lo cual facilita la movilidad de equipos en varios frentes de explotación.

En cuanto al método de retrollenado, se emplea en explotaciones de menor dimensión, donde el hueco llega a profundidades relativamente superficiales, menores de 30 m; no hay conformación de bancos y es apropiado para depósitos extensos, pero poco potentes.

Existe también el tipo de minería de subsistencia familiar, en el que se laborea con herramientas manuales, sin licencia ni planeamiento minero, y con una sola filosofía: la supervivencia. No se tiene conciencia de la protección del medio ambiente ni de su rehabilitación.

En el país, la gran minería de canteras está representada por las gravilleras y algunas ladrilleras, empresas cuya productividad les permite invertir en la rehabilitación del medio ambiente en el cual se desarrollan.

La mediana minería de arenas se hace mediante un solo corte y por banqueo, mientras que la gran minería se diferencia por la capacidad de los equipos y la extensión de las explotaciones.

Excluyendo la pequeña minería, los equipos empleados en la operación de arranque son en su mayoría buldóceres y, de manera marginal, retroexcavadoras. El cargue se efectúa con cargadores directamente y, en algunos casos, tolvas. La combinación más utilizada es buldócer-cargador.

La calidad de las arenas y gravas depende de la dureza, el lavado, la clasificación por tamaño y forma de la partícula. Cada una de estas condiciones es importante para determinadas aplicaciones en la industria.

3.4.1. Potencial

En el país existen unidades geológicas potencialmente idóneas para ser productoras de arenas y gravas, relacionadas sobre todo con el sistema andino colombiano, dominado por las cordilleras Occidental, Central y Oriental; sin embargo, ello no excluye la posibilidad de localizar depósitos en otras áreas del territorio. Colombia cuenta con un potencial de reservas geológicas prácticamente inagotable, lo cual garantiza la satisfacción de la demanda de estos materiales tan importantes para el desarrollo urbanístico del país. No hay cifras oficiales de reservas de arenas y gravas en el territorio nacional.

Adicionalmente, después del agua, las arenas, las gravas, las gravillas y la piedra son el insumo más abundante en la naturaleza, y en cualquier lugar, con mucha facilidad, se encuentran agregados; no todos son de la misma calidad, no todos son explotables, ni ambientalmente viables, pero son muy abundantes; de ahí su relativo bajo precio. Es importante valorar la inversión en la infraestructura.vial ya que afecta considerablemente el precio final. Hay suficientes agregados y proyectos para abastecer la demanda, e incluso se cree que en algún momento va a ser posible estudiar la posibilidad de exportar a islas del Caribe que no cuentan con abundante material de construcción (Minero, 2016).

3.4.2. Comercio

Como ya se anotó, los materiales naturales, como las arenas y las gravas, y en general todos los áridos, serán la fuente fundamental para armonizar el desarrollo sostenible del país. El potencial geológico de Colombia para la extracción de arenas y gravas es muy significativo, pero las disposiciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que restringen la explotación en áreas relativamente cercanas a los centros urbanos, se convierten en una presión para desarrollar proyectos que respondan a la oferta, e incluso impiden el control de los precios del mercado.

En Colombia la producción de arenas se ha mantenido muy constante en términos generales. En el año 2017 se reportó una producción de 2 978 530.97 m^3 (Agencia Nacional de Minería, 2018). Es importante que los municipios, en su formulación de planes de ordenamiento territorial, vean en la minería una fuente de ingresos y ejerzan un control tanto sobre la producción como sobre el sistema de extracción, para armonizar las actividades mineras con el medio ambiente, de acuerdo con las normas vigentes (tabla 17).

Se ha establecido que toda la demanda de arenas y gravas se consume a nivel local, pero algunos departamentos venden sus excedentes en el ámbito regional. En la figura 13 se expone la demanda de materiales de construcción durante el año 2015.

Tabla 17. Producción de arenas en Colombia (2013-2017) (en toneladas métricas)

Año	Minerales no metálicos de uso industrial	Mineral	Unidad de medida	Cantidad por mineral	Cantidad por clasificación
2013	Rocas y materiales de construcción	Arena de cantera	m^3	1 079 122.50	20 904 582
		Arena de río (arenas lavadas)	m^3	2 471 650.89	
		Basalto	m^3	—	
		Diabasa	m^3	442 067.85	
		Gravas de cantera	m^3	2 426 160.59	
		Gravas de río	m^3	8 658 079.16	
		Recebo	m^3	5 824 139.25	
		Asfaltitas	m^3	3362.00	
	Minerales no metálicos para uso industrial	Arenas silíceas	m3	174 182.02	174 182
2014	Rocas y materiales de construcción	Arena de cantera	m^3	1 163 155.75	14 063 582
		Arena de río (arenas lavadas)	m^3	1 268 028.25	
		Diabasa	m^3	133 718.00	
		Gravas de cantera	m^3	2 618 421.90	
		Gravas de río	m^3	5 703 466.37	
		Recebo	m^3	3 176 791.62	
2015	Rocas y materiales de construcción	Arena de cantera	m^3	637 503.85	11 526 873
		Arena de río (arenas lavadas)	m^3	810 946.46	
		Diabasa	m^3	144 882.48	
		Gravas de cantera	m^3	2 124 812.49	
		Gravas de río	m^3	4 255 266.62	
		Recebo	m^3	3 539 844.492	
		Asfaltitas	m^3	666.52	
		Basalto	m^3	12 950	
2016	Rocas y materiales de construcción	Arena	m^3	2 894 004.04	14 549 574
		Asfaltitas	m^3	10 702	
		Diabasa	m^3	259 705	
		Grava	m^3	6 552 451.38	
		Recebo	m^3	4 832 711.78	
2017	Rocas y materiales de construcción	Arena	m^3	2 978 530.97	15 217 178
		Asfaltitas	m^3	ND	
		Diabasa	m^3	615 422.93	
		Grava	m^3	7 104 576.95	
		Recebo	m^3	4 518 647.19	

ND: no se tiene información de producción hasta la fecha

Fuente: UPME (2017b), Agencia Nacional de Minería (2018)

Se puede decir que la demanda final de los materiales de construcción proviene precisamente del sector de la construcción; sin embargo, no hay cifras oficiales que indiquen una desagregación que permita identificar el peso de los materiales en este sector.

En cuanto al tema de las exportaciones de arenas, en 2015-2016 se registró un significativo aumento respecto a 2014: mientras en este año se exportaron 45 toneladas, en los dos años siguientes se llegó a 100 toneladas (UPME, 2017a) (figura 14).

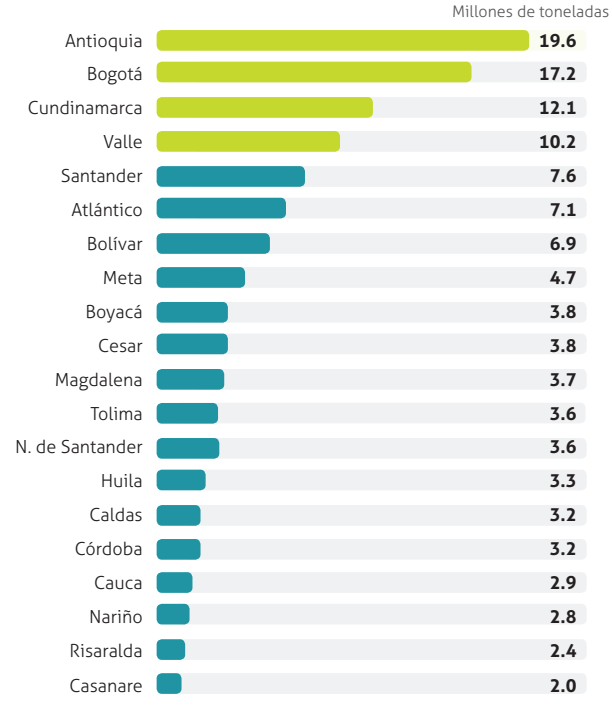


Figura 13. Demanda de materiales de construcción en el año 2015 en Colombia

Fuente: Dane. Cálculos propios en Mundo Minero (2016)

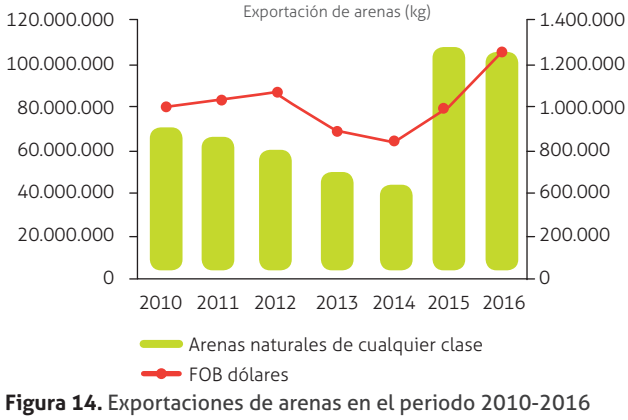


Figura 14. Exportaciones de arenas en el periodo 2010-2016

Fuente: DANE (s.f.)

3.4.3. Perspectivas

Las perspectivas de explotación de arenas y gravas son muy significativas, debido, en general, a que se ha incrementado la construcción en las principales capitales del país, especialmente en Bogotá. Además, los planes de construcción, infraestructura y las construcciones de vías de cuarta generación (4G) en el territorio colombiano hacen que la demanda de arenas, gravas y agregados impulse el crecimiento y desarrollo de las minas existentes y promueva nuevos proyectos para incrementar la oferta de estos materiales, de modo tal que la industria minera desarrolle estas actividades como constructora, dando prioridad a criterios sociales y teniendo como mira una mejor calidad de vida.

En la figura 15 se observa la proyección de demanda de materiales de construcción de las ciudades capitales para el año 2025.

Es importante que la cultura de conservación del medio ambiente y el concepto de sostenibilidad socioeconómico se conviertan, para la industria minera, en pilares sobre los que se sustente la planeación de esta actividad.

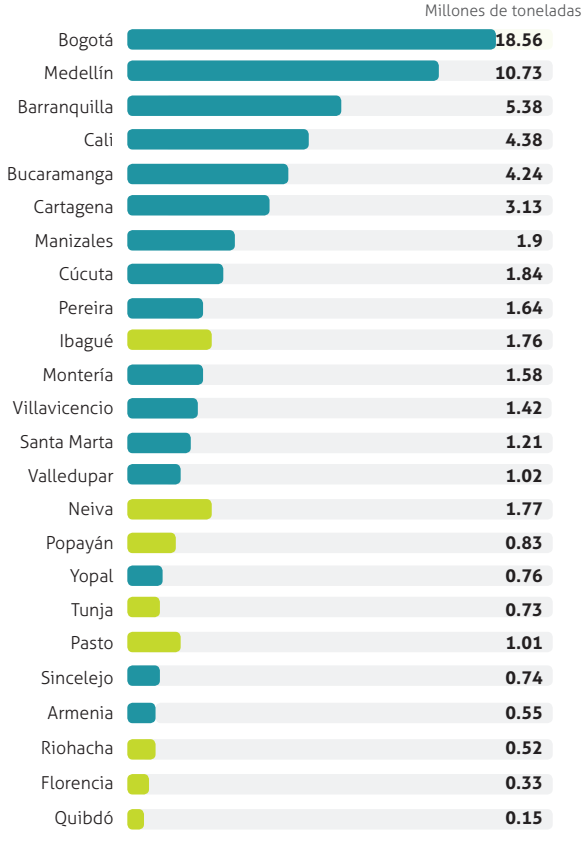


Figura 15. Proyección de demanda de materiales de construcción para el año 2025

Fuente: Mundo Minero (2016)

Para concluir, hay que acarar que el país se acoge a la tendencia mundial sobre el tema ambiental, que hoy en día trata de controlar esta actividad. En el caso colombiano, las limitaciones impuestas por la legislación minero-ambiental son muy asfixiantes: se exigen permisos mineros y ambientales, así como pagos de regalías adicionales a los impuestos que pagan todos los sectores. Por otro lado, las áreas donde se permite la extracción de los materiales están limitadas, pues se dejan por fuera bloques mineros de gran potencial. Además, se imponen costos adicionales, como el de restauración y control ambiental.

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Desde el punto de vista del medio ambiente, la industria de las arenas y gravas, al igual que la de las arcillas, tiene características generales muy similares, y la normativa, tanto del Ministerio de Minas y Energía como del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 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.

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 EFE. (16 de mayo de 2018). *La ONU calcula que el 68% de la población mundial será urbana en 2050*. Disponible en https://www.efe.com/efe/america/sociedad/la-onu-calcula-que-el-68-de-poblacion-mundial-sera-urbana-en-2050/20000013-3617928

Agencia Nacional de Minería (ANM) (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.

Aguilar, C., Leon, N. y Meléndez, M. (2005). *El sector de materiales de construcción en Bogotá*. Bogotá: Fedesarrollo.

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.

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

Asogravas. (17 de Agosto de 2016). *Mundominero.com.co*. Disponible en http://mundominero.com.co/el-buen-momento-de-los-materiales/

Ayala, C. y Rey, C. (2009). *Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50 000 aplicación a la modelización 2D y 3D en varias zonas de la peninsula Ibérica*. Disponible en http://info.igme.es/SidPDF/151000/881/151881_0000001.pdf.

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

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

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

Ceballos, C. (2002). *Estado de las playas en Colombia*. Santa Marta: Invemar.

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

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (DANE). (s.f). *Exportaciones- Históricos*. Disponible en https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones/exportaciones-historicos

Dawes, R. (2013). Geology 101 - *Introduction to Physical Geology. Basics--Depositional Environments.* Disponible en https://commons.wvc.edu/rdawes/g101ocl/basics/depoenvirons.html.

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*, 2(25), 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.

Edwards, B. (2015). La demanda insaciable de la arena. *Finanzas & Desarrollo*, 52(4), 46-47. Disponible en https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2015/12/pdf/edwards.pdf

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.

Fernández, M., Martínez, V., Duque, A. y Cruz, J. (2007). *Proceso de fundición en espuma perdida para la fabricación de autopartes. Dyna*, 74(151), 15-24. Disponible en https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/888

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

Gobernación de Antioquia (2005). *Plan de Desarrollo Minero de Antioquia, 2005-2020*. Medellín.

Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al*. (2006). Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000. Bogotá: Ingeominas.

González, L., Cárdenas, J. y Parrado, G. (2001). *Materiales de construcción para la Sabana de Bogotá*. Publicación especial (23). Bogotá: Ingeominas.

Harrison y Bloodworth. (1994). *Industrial minerals laboratory manual construction materials.* Technical Report. Londres: British Geological Survey.

Hernández, A. (1998). *Explotación subterránea de canteras: una alternativa económica y ambiental en zonas urbanas.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Herrera, J. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto.* Disponible en http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf

Highley, D. (2005). *The role of imports to UK aggregate supply.* Londres: British Geolgical Survey.

Instituto Geológico y Minero de España. (IGME). (2003). *Arcillas: recursos minerales, riesgos geológicos y geoambientales. Fuente original.* Madrid: Panorama Minero.

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

Jiménez, J. y Justo Alpañes, J. (1975). *Geotécnica y cimientos II: propiedades de los suelos y de las rocas* (2.ª ed.). Madrid: Rueda.

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

Langer, W. y Glanzman, V. (1993). *Natural aggregate-building America's future*. Circular 1110.39, USGS. Disponible en http://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1110

López, M. (2003). *Rocas industriales de Venezuela*. Venezuela: Fundacite Aragua.

Marquínez, G., Rodríguez, Y. y Fuquén, 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.* Medellín: Ingeominas.

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

Minero, M. (2016). *El buen momento de los materiales.* Disponible en http://mundominero.com.co/el-buen-momento-de-los-materiales/.

Ministerio de Minas y Energía (2013). *Explotación de materiales de construcción: canteras y material de arrastre*. Bogotá.

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

Montoya, D. y Reyes, G (2007). *Geología de la Sabana de Bogotá*. Publicaciones especiales de Ingeominas (28). Bogotá: Ingeominas.

Mundo Minero, (2016). El buen momento de los materiales. Disponible en http://mundominero.com.co/el-buen-momento-de-los-materiales/

Mundo Minero, (2017). Materiales de construcción jalonan la minería del país. Disponible en http://mundominero.com.co/materiales-de-construccion-jalonan-la-mineria-del-pais/

Niño Hernández, J. (1998). *Técnicas y propiedades del concreto* (tomo I). Bogotá: Asocreto.

Núñez, A. (1987). *Arenas y gravas silíceas* en Recursos minerales de Colombia (2.ª ed., tomo II). 660- 674. Bogotá: Ingeominas.

Perea, O. (2003). *Producción de arenas en explotaciones petroleras.* Bogotá: Universidad de los Andes.

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

Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUM). (2016). *Informe anual 2015*. Disponible en https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7544/-UNEP_Annual_Report_2015-2016UNEP-AR-2015-_ES_web.pdf.pdf?sequence=11&isAllowed=y

Regueiro, M. y González, B. (2004). *Extracción de áridos en la Unión Europea en el marco de la estrategia del uso sostenible de los recursos naturales.* Buenos Aires: E. C. S. A.

Rodríguez, A. (1987). Materiales de construcción. En *Recursos minerales de Colombia*, (2.ª ed., tomo II). Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, A. (1998). *Las arcillas: aportes a su conocimiento, evaluación y caracterización físico-cerámica.* Informe 2304b. 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. Bogota: Ingeominas.

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

Smith, M. y Collis, L. (2001). *Aggregates: Sand gravel and crushed rock aggregates for construction purpose*. Londres: Geological Society Engineering Geology.

Statista (2017). *Ranking de los principales países productores de arena y grava a nivel mundial en 2017.* Disponible en https://es.statista.com/estadisticas/636809/paises-lideres-en-la-produccion-de-arena-y-grava-a-nivel-mundial/.

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

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2005). *Distritos mineros, exportaciones e infraestructura de transporte.* Disponible en http://www.upme.gov.co/docs/distritos_mineros.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2016). *Resolucion 184 de 2016 del 30 marzo de 2016.* Disponible en https://www.anm.gov.co/sites/default/files/Regalias/resol_upme_184_marzo_30_2016_minerales_no_metalicos_a_partir_de_abril_1o._2016.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2017a). *PNDM_2017. Boletín estadístico 2012- 2016.* Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Paginas/Busqueda.aspx?k=Producci%C3%B3n%20de%20arenas%20en%20Colombia%202013%202017

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2017b). *Informe de produccion anual - Minerales industriales. Informe interno*. Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017c). *Informe de produccion anual: minerales industriales*. Bogotá.

USGS (2017). *Sand and gravel (construction)*. Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/sand_&_gravel_construction/mcs-2017-sandc.pdf.



Grava
Fuente: https://pixnio.com/es/texturas/textura-roca-piedra/resumen-guijarro-patron-grava-piedra-granito-textura



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.

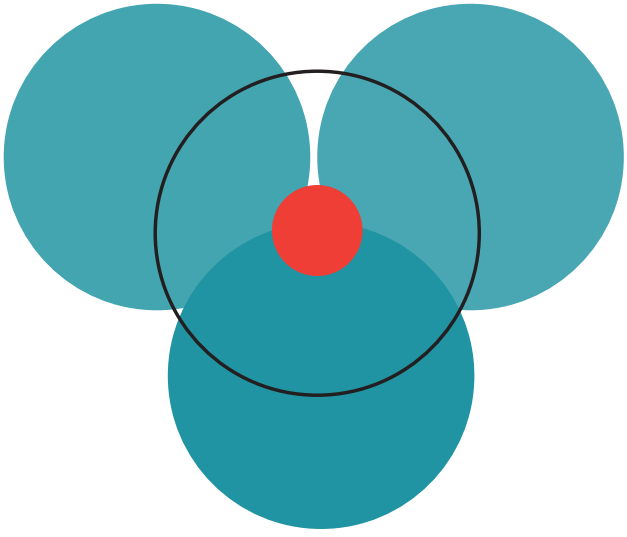


Figura 1. El tetraedro elemental, o la pirámide triangular, muestra un átomo central de silíceo

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).

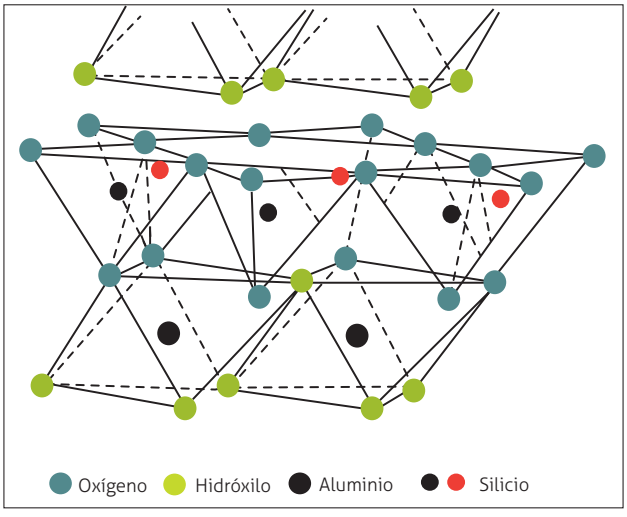


Figura 2. Lámina T-O (estructura de la caolinita).

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).

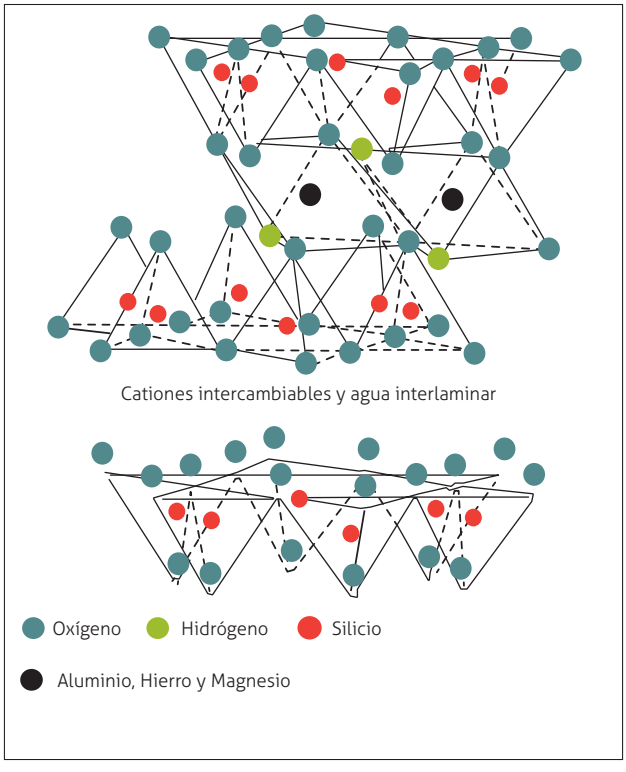


Figura 3. Lámina T-O-T (estructura elemental de la montmorillonita).

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**).

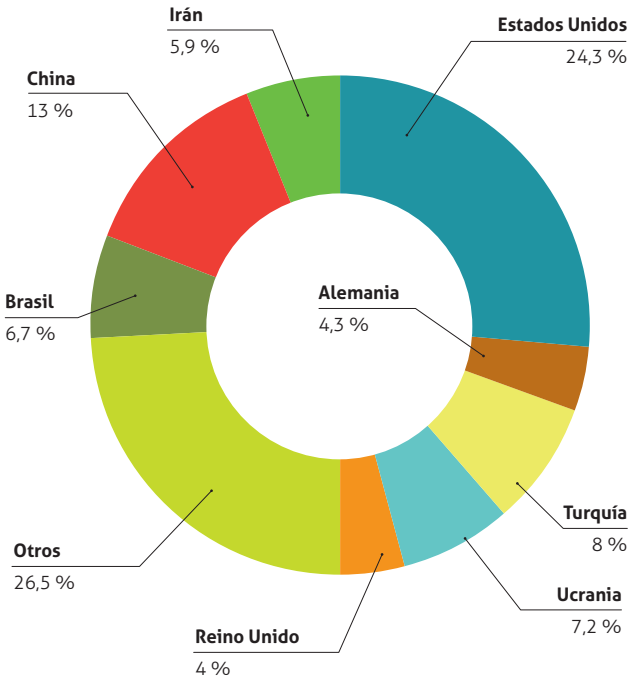


Figura 4. Participación en la producción de caolín en 2015
Fuente: BGS (2015)

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)

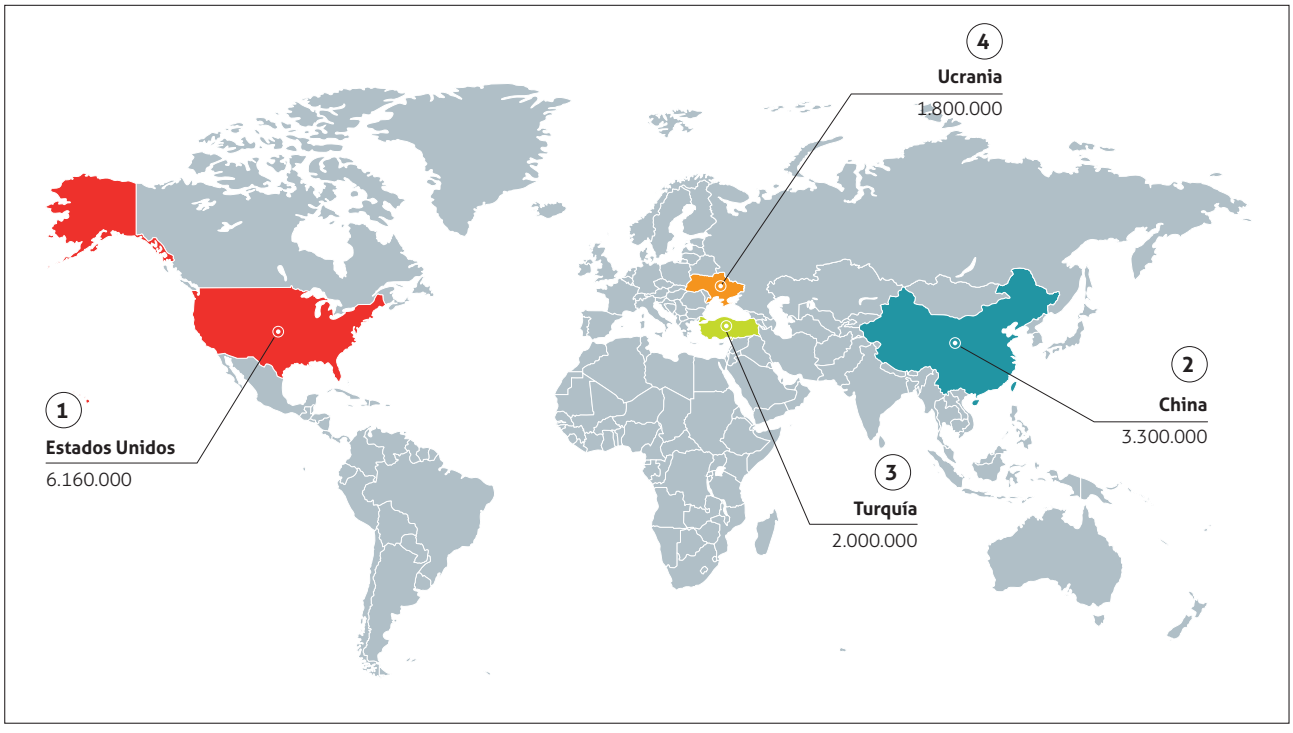


Figura 5. Principales países productores de caolín en el 2015
Fuente: BGS (2015)

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)

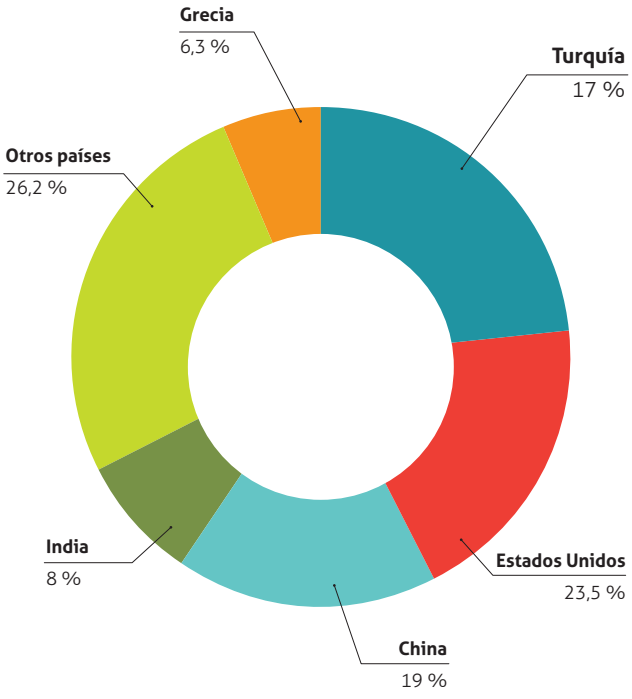


Figura 6. Participación en la producción mundial de bentonita en el año 2015
Fuente: BGS (2015)

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)

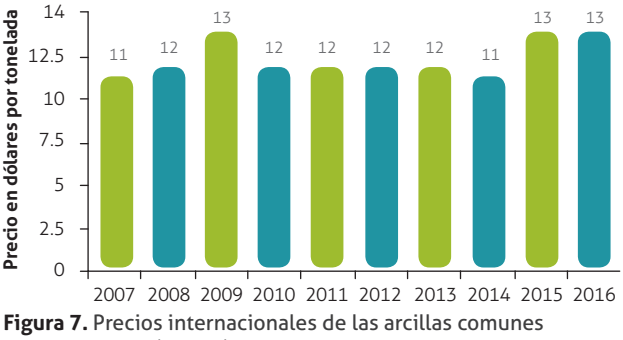


Figura 7. Precios internacionales de las arcillas comunes
Fuente: Statista (2017a)

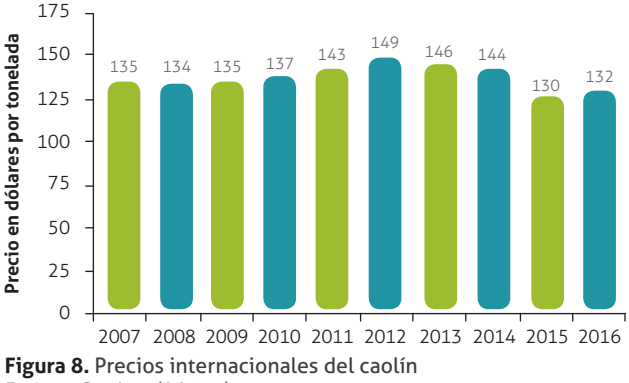


Figura 8. Precios internacionales del caolín
Fuente: Statista (2017c)

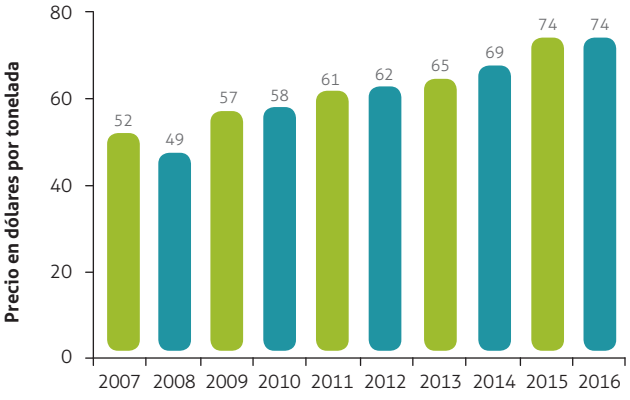


Figura 9. Precios internacionales de la bentonita
Fuente: Statista (2017b)

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)

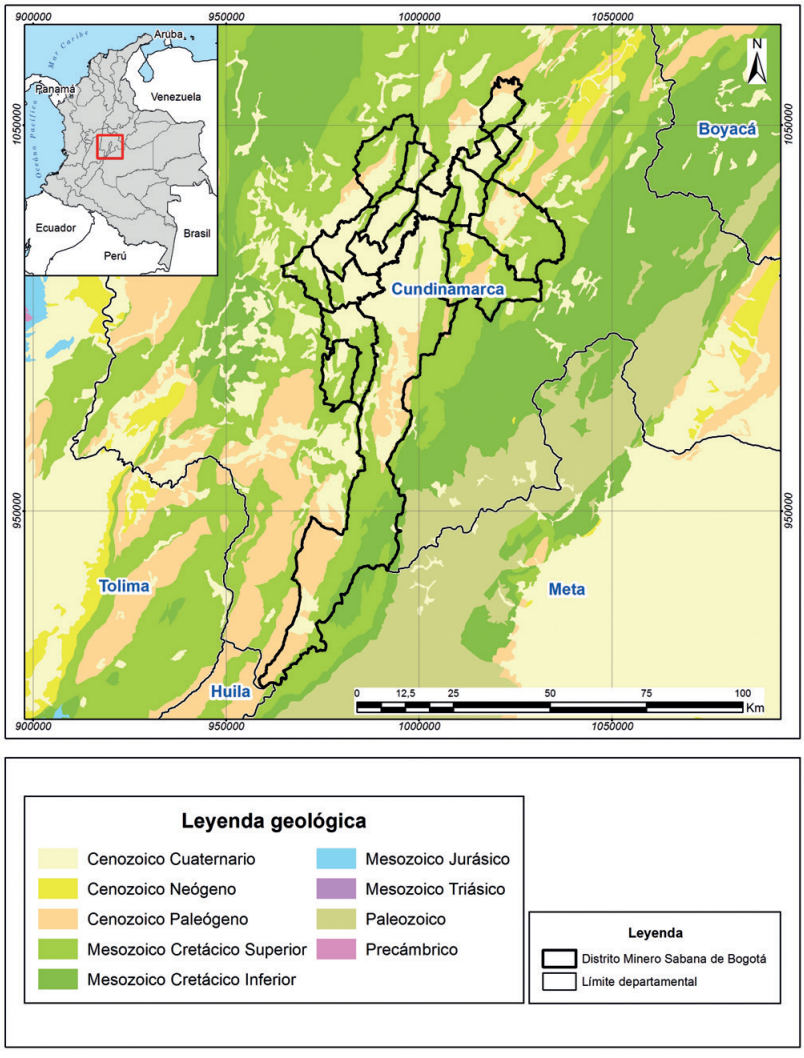


Figura 10. Distrito minero Sabana de Bogotá
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

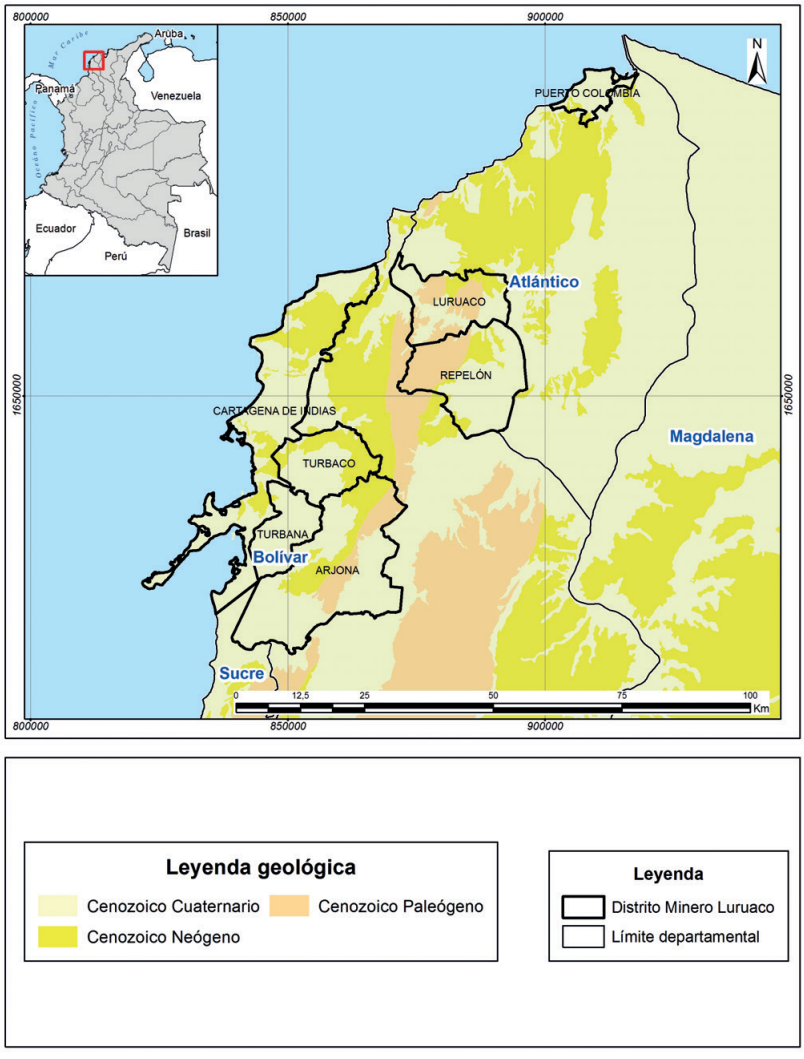


Figura 11. Distrito minero Luruaco
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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).

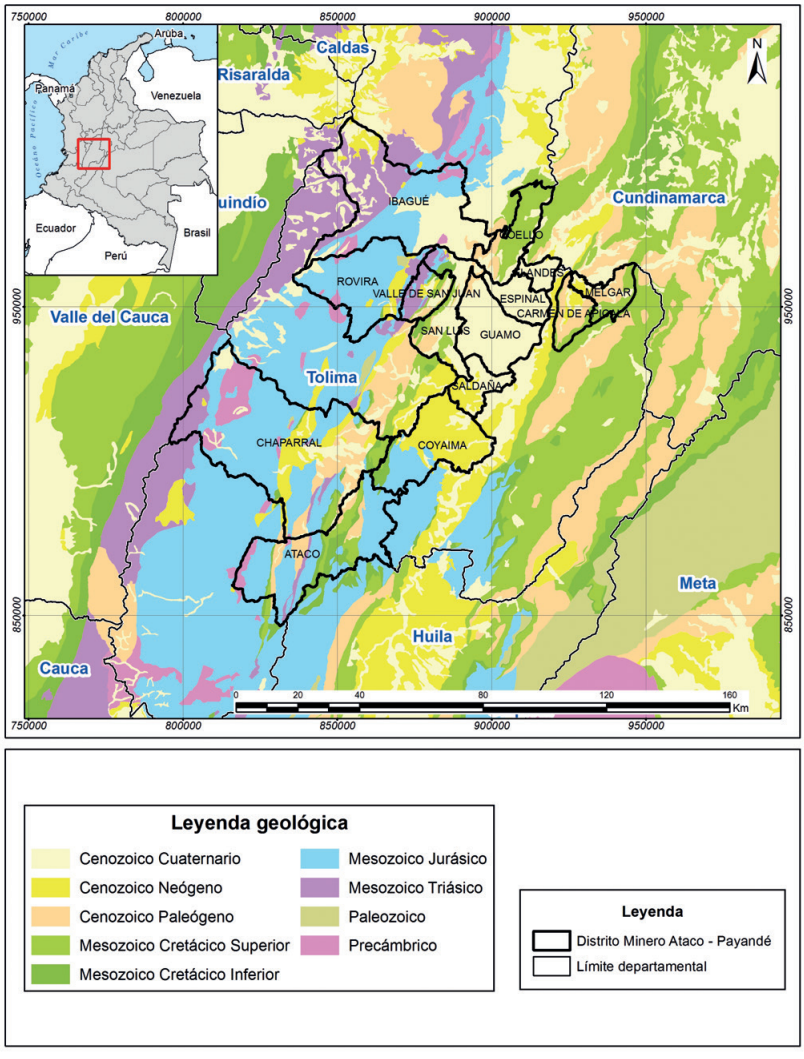


Figura 12. Distrito minero Ataco-Payandé
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

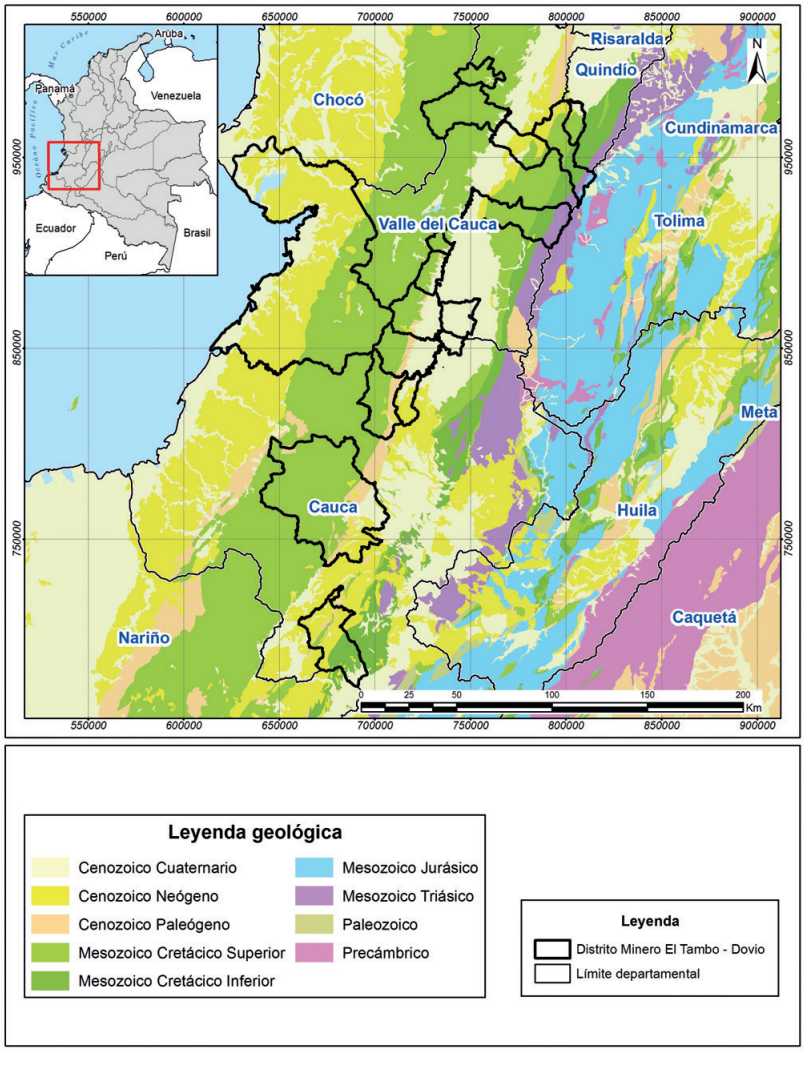


Figura 13. Distrito minero El Tambo-El Dovio
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

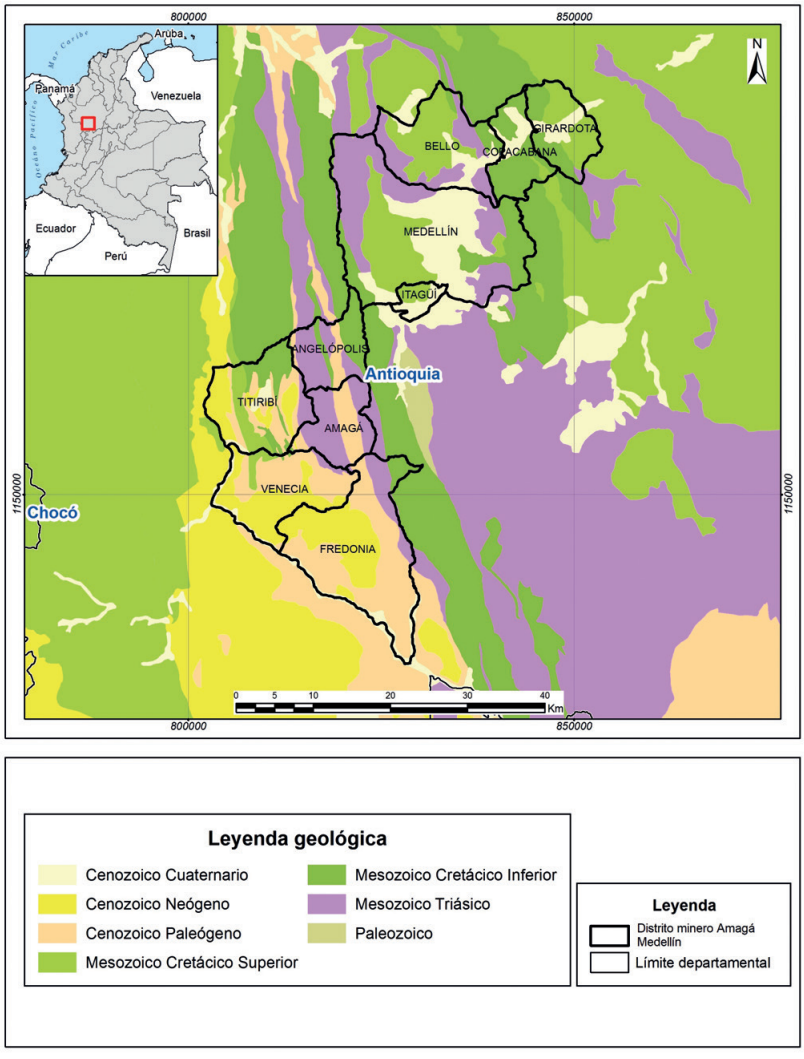


Figura 14. Distrito minero Amagá-Medellín
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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)

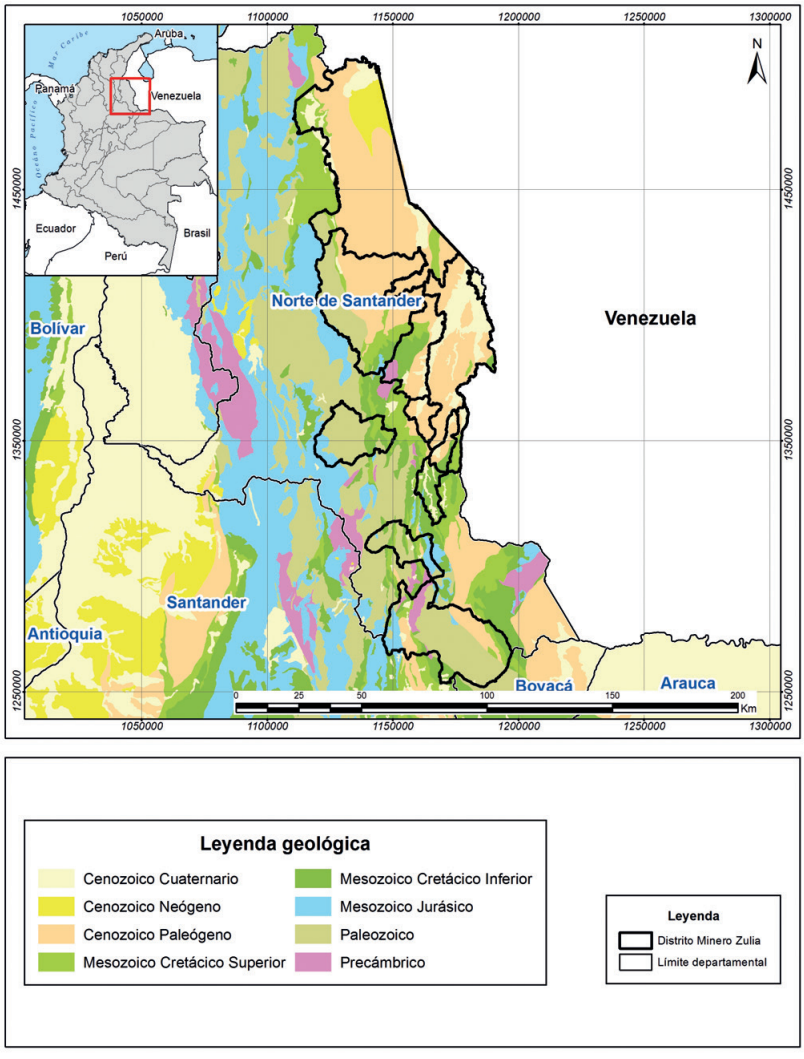


Figura 15. Distrito Minero El Zulia
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

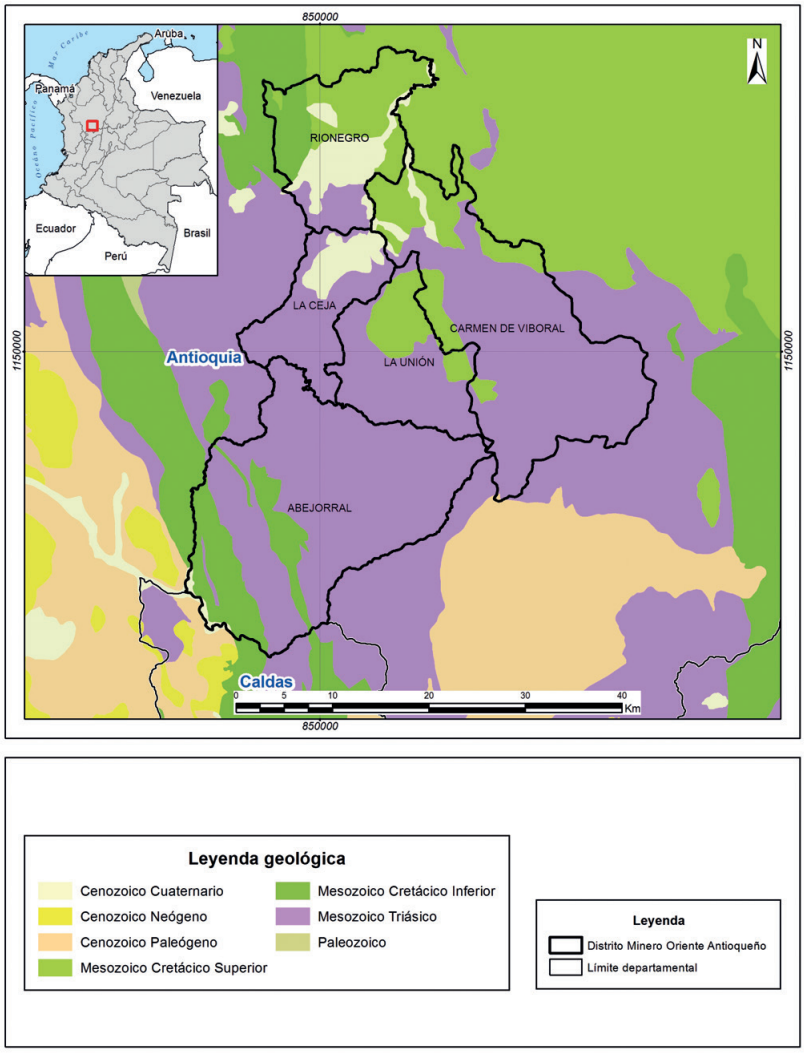


Figura 16. Distrito minero Oriente Antioqueño
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

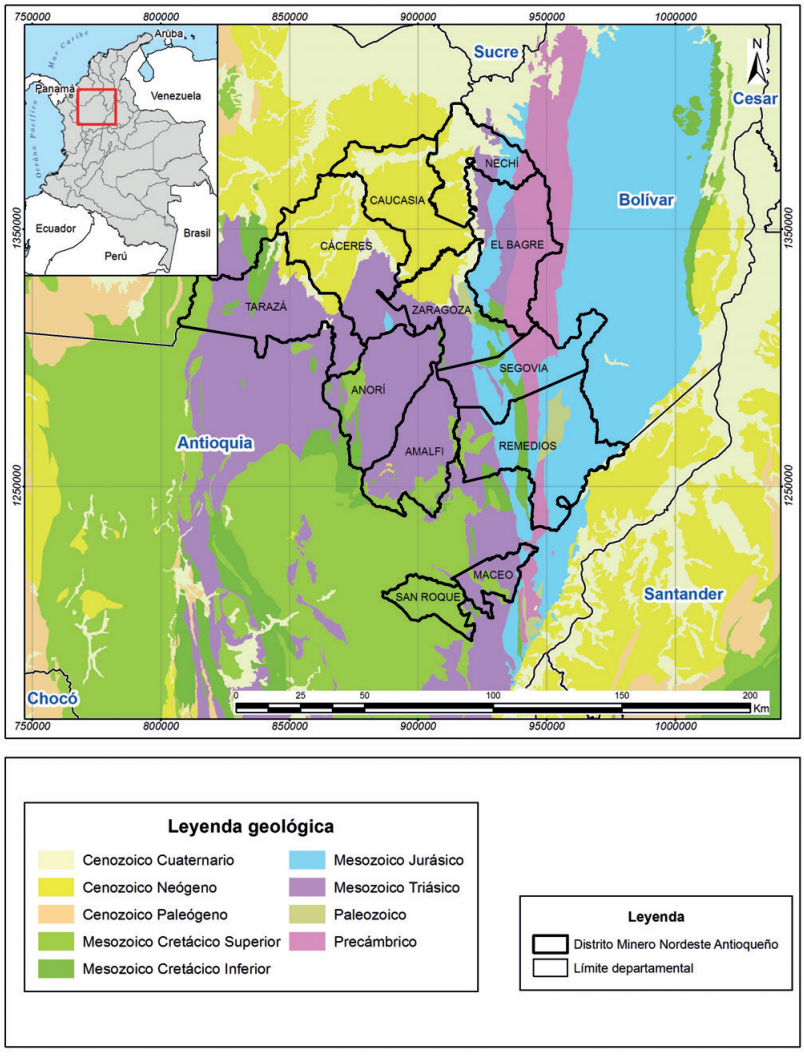


Figura 17. Distrito minero Nordeste Antioqueño
Fuente: modificado a partir de UPME (2005)

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.

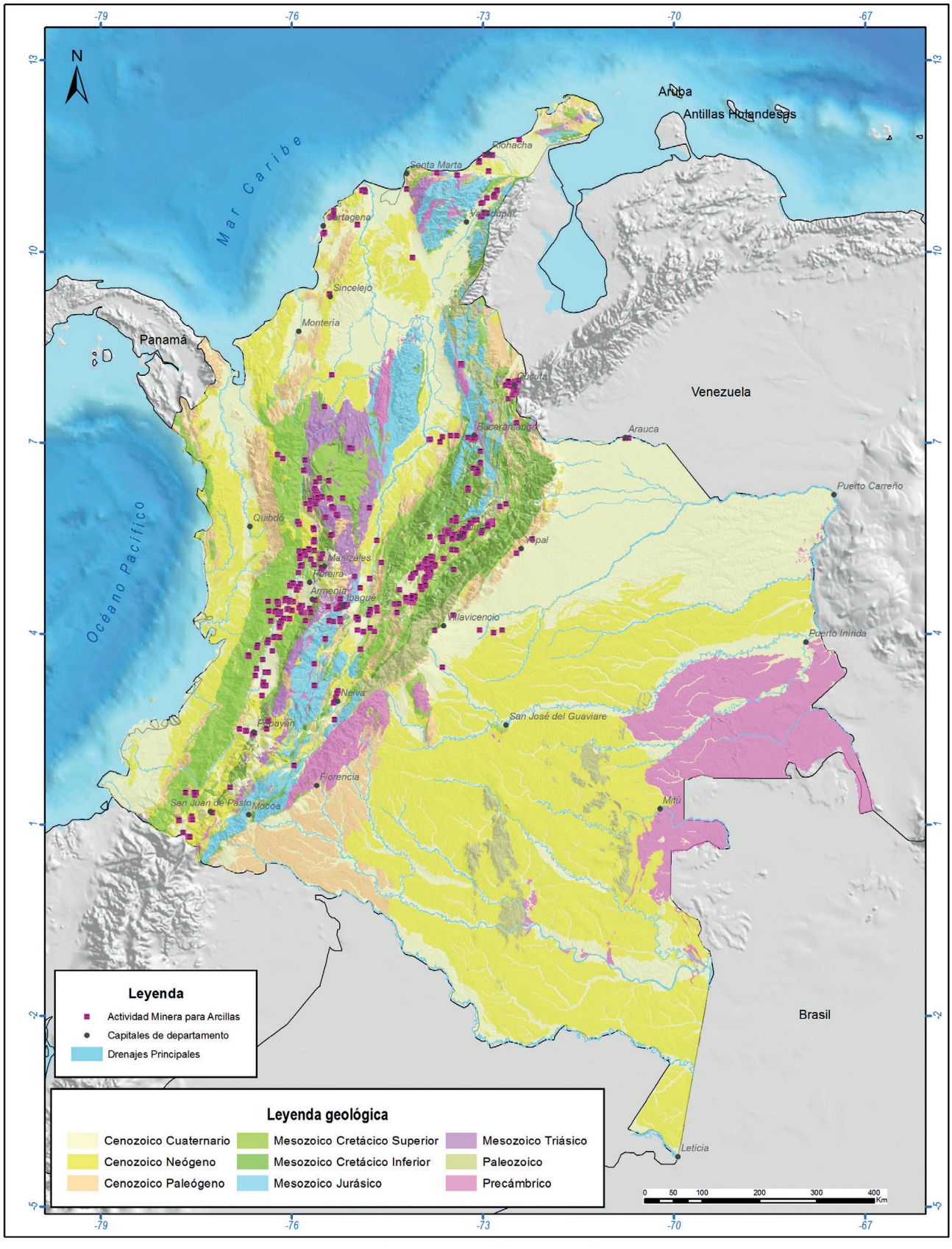


Figura 18. Principales zonas con actividad minera de arcillas en Colombia

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.

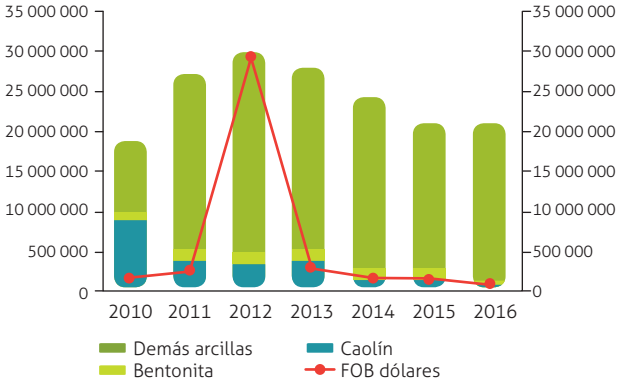


Figura 19. Exportaciones de arcillas en el periodo 2010-2016 (cifras en kg)
Fuente: UPME (2017c)

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



Neis biotítico.
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Rocas ornamentales

Javier Eduardo Becerra y Orlando Pulido González

Citación: Becerra, J. E. y Pulido, O. (2019). Rocas ornamentales. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Las rocas ornamentales son aquellas que, después de un proceso de tratamiento, pueden usarse como materiales nobles de construcción, para la elaboración de elementos de ornamentación, de arte funerario y escultórico, de objetos artísticos variados, conservando integralmente su composición, textura y características físico-químicas (López, 1996). Se utilizan en la industria de la construcción como tejares, enchapes, mesones, en escritorios, ornamentación, revestimientos exteriores de muros, fachadas y zonas de intenso tráfico, tales como calles, andenes y escaleras (figura 1).

El empleo de rocas en la ornamentación es una de las actividades más antiguas del hombre. Los egipcios, 2600 años a. C., utilizaron bloques de calizas y granitos para la construcción de las pirámides. Los palacios, tumbas, monumentos, basílicas, columnas, termas y acueductos de las culturas persa, griega y romana se caracterizan por el amplio uso de la roca en su construcción. Generalmente, los términos *rocas ornamentales*, *piedras ornamentales*, *piedras naturales* y similares hacen referencia a aquellas rocas que, sin sufrir tratamientos diferentes de los procesos normales de corte, pulido o tallado, se usan para fabricar productos que exhiban sus propiedades naturales. Por tanto, deben ser rocas que por sus características físicas y tecnológicas, y por su grado de fracturación, permitan su explotación en forma de bloques.



Figura 1. Utilización de rocas ornamentales. Superior izquierda: arenita para la fabricación de ornamentos de la iglesia colonial de Tutazá. Superior derecha: lajas de areniscas de la Fm. Une utilizadas en andenes y paredes exteriores del pueblito Boyacense (Duitama). Inferior izquierda: parque central de Málaga: caliza de la Fm. Tibú Mercedes. Inferior derecha: arenitas cuarzosas de la Fm. Une usada en pisos y paredes exteriores (Santa Rosa de Viterbo)

Fuente: Becerra, J., Montaña, J., y Escobar, I. (2011)

1. Usos

En la industria de rocas ornamentales, todos los materiales pétreos se engloban en cuatro grupos, denominados genéricamente *granitos*, *mármoles*, *pizarras* y *otras piedras* (López, 1996).

1.1. Clasificación de rocas ornamentales

La clasificación comercial no está directamente relacionada con su clasificación petrográfica. Se manejan, así, las siguientes denominaciones:

1.1.1. Granitos

Conjunto de rocas ígneas compuestas por diversos minerales que se explotan en forma de bloques de naturaleza coherente y que se utilizan en la construcción para decoración, es decir, se aprovechan sus cualidades estéticas, una vez tratadas, con procedimientos tales como aserrado, pulido, tallado, esculpido, etc. Esta denominación incluye, además del granito propiamente dicho en sus distintas variedades, pegmatitas, granodioritas, monzonitas, tonalitas, dioritas y neises (figura 2).



Figura 2. Ejemplo de granito

Fuente: Jair Ramirez, SGC

1.1.2. Mármoles y calizas marmóreas

Conjunto de rocas constituidas fundamentalmente por minerales carbonatados de dureza 3-4 (calcita, dolomita, etc.). Esta denominación incluye los mármoles propiamente dichos, que son rocas metamórficas compuestas esencialmente de calcita o de dolomita. Las calizas denominadas *marmóreas* son rocas carbonatadas, a menudo recristalizadas, compactas, de grano fino, que normalmente tienen vetas de calcita e impurezas que proporcionan colores variados, y que a veces incluyen fósiles. Se incluyen en este grupo los travertinos y las serpentinitas (figura 3).



Figura 3. Ejemplo de mármol metamórfico

Fuente: fotografía de Marmolería Río Nare, departamento de Antioquia, Colombia. Museo Geológico José Royo y Gómez, SGC, 2018

1.1.3. Pizarras

Son rocas metamórficas de grano fino que presentan una exfoliación característica, a causa de la orientación planar de sus minerales principales, que constituye la esquistosidad. Los componentes mineralógicos principales de estas rocas son sericita, cuarzo y minerales del grupo de la clorita; como accesorios pueden contener carbonatos, óxidos y sulfuros metálicos, y minerales arcillosos, entre otros. Se utilizan fundamentalmente para cubiertas exteriores de tejados (figura 4).



Figura 4. Pizarras ornamentales

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

1.1.4. Otras piedras

Son rocas de carácter heterogéneo. Se incluyen en este grupo materiales como las areniscas, las cuarcitas, los basaltos, etc. En el ámbito internacional su importancia económica se va acrecentando en relación con los otros grupos (Chiodi, 2010).

1.2. Aplicaciones de las rocas ornamentales

La roca natural se utiliza en obras de restauración y remodelación de edificios antiguos de interés patrimonial nacional o mundial, y en construcciones modernas, ya sea en interiores, en pisos y paredes, o en exteriores, como fachadas, pisos. También se usan en ornamentación, en muchos casos combinadas con otros materiales, como el vidrio y el aluminio. La gran ventaja del uso de rocas naturales reside en su belleza, su efecto positivo en la valorización de las construcciones donde se utilizan y su alta durabilidad, comparada con otros tipos de materiales.

La inagotable variedad de rocas naturales, su génesis y la variedad de sus colores, así como las numerosas técnicas de instalación desarrolladas, permiten satisfacer las demandas de los arquitectos e ingenieros para las construcciones más desafiantes en diseño y creatividad. Las rocas ornamentales se emplean generalmente para decorar interiores y exteriores, y su uso es tanto industrial como residencial. Los siguientes son algunos de los usos que se les da:

1.2.1. Recubrimiento de fachadas o exteriores

Esta aplicación tiene por objeto proporcionar elegancia a la edificación en general y, a la vez, proteger los elementos estructurales de las construcciones. Los granitos y las serpentinas son las piedras naturales más utilizadas, porque una de sus propiedades es que conservan su brillo por mucho tiempo. Otros materiales, como areniscas y pizarras, se usan también para enchapes de exteriores.

1.2.2. Recubrimiento de techos

El material más usado en esta parte de las construcciones, generalmente residenciales, son las pizarras (denominadas de manera coloquial *pizarras de techar*), que son dispuestas a manera de tejas. Ocasionalmente, estas pizarras también se utilizan en el recubrimiento de exteriores.

1.2.3. Recubrimiento de interiores

Como su nombre lo indica, tiene aplicación en los interiores de los grandes edificios, bancos, palacios, oficinas, centros comerciales, centros religiosos, hoteles y grandes residencias. Generalmente los mármoles, calizas y materiales exóticos son los materiales preferidos para esta clase de uso.

1.2.4. Recubrimiento de pisos

En los grandes centros comerciales es común utilizar placas de granitos por su resistencia al tráfico intenso. En casas, algunos edificios, oficinas y locales se emplean baldosas de mármol; aquí se pueden incluir los peldaños de escaleras y pasamanos, que también usan granitos y mármoles.

1.2.5. Usos domésticos

Las rocas ornamentales se utilizan cada vez más en las residencias, sobre todo como mesones de cocina, comedores, mesas de centro, lavamanos y otros.

1.2.6. Muros y cercas de roca

En este tipo de uso se aprovechan grandes bloques, cantos y guijos de piedra natural, al igual que algunos desechos de la misma industria de piedras ornamentales que se emplean para construir barreras, muros, cercas delimitantes de terrenos, terraplenes y pedraplenes.

1.2.7. Obras de arte y esculturas

Para esta actividad en general se usan los granitos y los mármoles.

1.2.8. Arte funerario

En la industria de elaboración de las lápidas funerarias, mausoleos y bóvedas, las rocas ornamentales más utilizadas son los mármoles y las calizas.

Atendiendo al tipo de roca, se describen los usos principales así: los depósitos de pizarras, filitas y esquistos se utilizan en láminas para cubrir los techos de pequeños edificios. Los neis se utilizan en la construcción, para pavimentación de carreteras, baldosas, aceras y mamposterías. Las anfibolitas ocasionalmente se usan como piedras de ornamentación. Las serpentinas a menudo son empleadas en la construcción, como revestimiento, en forma de láminas pulimentadas.

Por otra parte, los mármoles representan la materia prima más utilizada en escultura. Con menos frecuencia se utilizan en la fabricación de cal y en la industria química. Por último, las cuarcitas, como material de construcción, se utilizan a menudo para pavimentación. Además, puede emplearse en la industria del vidrio, en cerámica y en la fabricación de refractarios ácidos. Los granitos son las rocas más empleadas en la industria de la ornamentación, en lozas, enchapes, pisos, mesones, etcétera.

2. Ambiente geológico

El objeto del presente capítulo es, por un lado, explicar los mecanismos de formación de los distintos grupos de rocas, y, por otro, presentar de manera simplificada los rasgos básicos y las características más importantes de las diversas clases de rocas que forman la corteza terrestre, y que tras su extracción y tratamiento estarán listas para ser comercializadas y utilizadas como rocas ornamentales.

2.1. Características

Cualquier variedad comercial de roca ornamental se engloba en alguno de los cuatro grupos ya descritos. La dureza es un factor muy importante en los procesos de aserrado, y ha permitido clasificarlas informalmente en rocas duras, semiduras o intermedias y blandas.

2.1.1. Físico-químicas y mecánicas

Las características físico-químicas y mecánicas, determinadas por una serie de análisis y ensayos de laboratorio específicos, son otro aspecto fundamental que se tiene en cuenta a la hora de aprovechar las rocas ornamentales, ya que informan sobre características que, en últimas, definen sus aptitudes para determinados usos (tabla 1), y por tanto su viabilidad comercial. Los patrones de los ensayos están controlados por los países con mayor desarrollo de esta industria y líderes en los mercados del mundo, tales como China, Italia, India, España, Brasil, Portugal, Alemania y Estados Unidos.

Tabla 1. Algunas especificaciones para rocas destinadas a revestimientos, y métodos de ensayo

Tipos de roca		Propiedades			
		Densidad aparente (kg/cm³)	Absorción de agua aparente (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (tres puntos, MPa)
Granitos		>2560	<0.4	>131	10.34
Mármoles	Travertino	>2595	<0.75	>52	>7
	Calcítico	>2800	<0.75	>52	>7
	Serpentinítico	> 2690	< 0.75	> 52	> 7
	Dolomítico	> 2305	< 0.75	> 52	> 7
Calizas	Baja densidad	1760/2160	< 12	> 12	> 2.9
	Media densidad	2160/2560	< 7.5	> 28	> 3.4
	Alta densidad	> 2560	< 3.0	> 55	> 6.9
Areniscas	> 60 % SiO_2	> 2160	< 20	> 13.8	> 2.1
	> 90 % SiO_2	> 2400	< 3	> 68.9	> 6.9
	> 95 % SiO_2	> 2560	< 1	> 137.9	> 13.9

Fuente: Frazão (2002)

Entre los ensayos que se realizan comúnmente a las rocas para usarlas como piedras de ornamentación sobresalen el análisis petrográfico, los análisis de composición química y mineralógica, y los ensayos de caracterización tecnológica. Entre estos últimos se encuentran la determinación del peso específico, absorción, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia al choque, resistencia al desgaste por rozamiento o abrasión, resistencia a las heladas, determinación del módulo de elasticidad, determinación del coeficiente de dilatación lineal y ensayo de microdureza de Knoop.

Otros ensayos de suma importancia aplicados a las rocas ornamentales son los de alterabilidad, que permiten establecer el comportamiento de la piedra natural ante diversas condiciones medioambientales y las solicitaciones a que va a someterse. La determinación de la alterabilidad comienza con el análisis petrográfico, que permite describir la composición mineralógica básica de la roca, así como su cristalización y estructura, y definir las características mineralógicas y texturales que pueden precisar la susceptibilidad de la roca a los procesos de alteración. Otros ensayos especializados, conocidos con el nombre de *ensayos de envejecimiento* o *de alteración acelerada*, son de necesaria realización para evaluar la alterabilidad de las rocas. Estos ensayos están regidos por normas específicas, como el ensayo de cristalización de sales (EN12370) y el de envejecimiento por acción del SO_2 (EN13919), y junto con la aplicación de técnicas analíticas, como la difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF) y la microscopia electrónica de barrido (SEM), permiten hacer un análisis científico muy completo sobre la naturaleza de la roca, al igual que sobre su comportamiento y alterabilidad ante diferentes condiciones ambientales y a sus usos específicos (figura 5).

El concepto de durabilidad está relacionado con el de alterabilidad, y es factor esencial para la aplicación de las piedras de ornamentación. La durabilidad de una roca o piedra es la aptitud para resistir a los agentes del entorno atmosférico, ya sean físicos, químicos o biológicos, que suelen alterar y fragmentar el material. Agentes físicos como las variaciones térmicas que generan dilatación diferencial térmica o cristalización de hielo en poros y fisuras inciden directamente en sus propiedades mecánicas y, por tanto, en su durabilidad. Agentes químicos como las sustancias presentes en el aire contaminado producen reacciones con los minerales constituyentes que dan origen a procesos de degradación. Agentes biológicos (crecimiento de líquenes, hongos o plantas superiores) (figura 5) también pueden causar efectos nocivos en las rocas (Del Monte, 2006).

Como se anotó en los párrafos anteriores, los ensayos de alterabilidad determinan la capacidad de la roca para resistir al medio físico al que se va a exponer sin que sufra pérdidas en sus características estéticas y propiedades geomecánicas. De ahí la importancia de realizar estos ensayos y su necesaria utilización en la industria de la piedra natural. Los granitos presentan una alta dureza, pero incluyen en su composición minerales fácilmente alterables al contacto con el medio ambiente natural, así que se puede deducir que la acción de la intemperie sobre las edificaciones o sus complementos genera una degradación, que será más rápida o más lenta en función de las condiciones



Figura 5. Alteración de la arenisca pietra serena por agentes biológicos y medioambientales. Alteración biológica (superior izquierda); procesos de arenización y exfoliación (superior derecha). Eflorescencias salinas en calizas ornamentales (inferior izquierda); imagen de SEM que muestra corrosión de cristales de calcita por yeso neoformado en ensayo de envejecimiento por acción del SO_2 (inferior derecha)

Fuentes: Becerra (2009) y Becerra y Costa (2008)

ambientales, de instalación y climáticas, así como de la naturaleza de la roca, especialmente en función de su grado de fractura, su porosidad y su composición mineralógica en particular. Los minerales que pueden incidir en la susceptibilidad a la alteración de las rocas graníticas son los siguientes:

- **Feldespatos:** son los minerales más fácilmente alterables en las rocas graníticas. Cuando están frescos son de alta dureza, aptos para un buen pulido y tienen muy baja capacidad de absorción de agua. Sin embargo, cuando se alteran producen minerales arcillosos, como el caolín y la illita, que presentan caracteres diametralmente opuestos, es decir, son de baja dureza, no aptos para el pulido y tienen muy alta capacidad de absorción de agua.
- **Micas:** los granitos a menudo contienen micas, siendo las más importantes la biotita y la moscovita. Ambos minerales son mucho más blandos que el cuarzo y los feldespatos, y tan alterables como los feldespatos. Su alteración origina minerales como la clorita, que proviene de la biotita, y la illita, generada por la moscovita. Así las cosas, un abundante contenido de micas en granitos puede implicar riesgos de alterabilidad y, por consiguiente, generar problemas de estabilidad mecánica.
- **Anfíboles:** se ha determinado que los anfíboles son metaestables en condiciones atmosféricas adecuadas, pero tienden a alterarse con relativa facilidad.

- **Sulfuros:** las rocas graníticas que, como minerales secundarios, suelen incluir sulfuros en su composición. Los más comunes son los sulfuros de hierro, como la pirita, marcasita y pirrotina. En determinados casos, especialmente en ambientes atmosféricos agresivos, estos minerales pueden alterarse y generar sulfatos y óxidos que dan origen a manchas generalmente de color marrón a rojizas.

Por último, se menciona la textura de las rocas graníticas, que por lo regular no presenta una influencia clara en la alterabilidad del material, salvo en el sentido general de que las rocas cuyo grano es más grueso son más alterables que las de grano fino (Higueras y Oyarzún, 1998).

Además de los ensayos de caracterización tecnológica, se usan técnicas no destructivas para conocer las características de la piedra natural. Entre estas técnicas se encuentran el ultrasonido, la tomografía axial computarizada, los análisis de imágenes, la evaluación de propiedades hídricas *in situ* y otras que complementan la información obtenida en los ensayos normalizados de caracterización tecnológica y ayudan a tomar la decisión de usar determinados tipos de rocas ornamentales, especialmente en procesos de sustitución de materiales en obras civiles y restauración de monumentos arquitectónicos (Becerra, 2009).

2.1.2. Comerciales

En el grupo de los granitos, desde el punto de vista comercial se incluyen aquellas rocas que en su composición tienen feldespatos y presentan una textura granítica o néisica. En este grupo se hallan las rocas magmáticas, como sienitas, gabros, monzonitas, dioritas, granitos, cuarzodioritas, granodioritas y demás plutónicas y volcánicas, como riolitas, dacitas, andesitas y basaltos. Las dioritas y gabros se denominan comercialmente *granitos negros*.

En relación con la dureza, los granitos son considerados rocas duras. La resistencia de estos materiales a esfuerzos compresivos puede ser superior a los 2000 kg/cm^2, o su equivalente, 200 Mpa (megapascales).

Las rocas graníticas, después de procesadas, reciben nombres generalmente asociados al lugar o cantera donde son explotadas, y dependen de la textura, del color, de la composición o de la variedad de la roca como tal. En la provincia de Córdoba (Argentina) reciben diferentes nombres, como gris mara (granito), tango azul (neis) o rojo san Luis (tonalita).

En función de la proporción de minerales máficos o félsicos, los granitos comerciales pueden dividirse en dos grandes grupos: granitos claros, que engloban especies como la adamelita, granodioritas, sienitas, granitos en sentido estricto y rocas metamórficas, y granitos oscuros, que incluyen gabros, dioritas, diabasas, pórfidos e incluso rocas volcánicas.

En el grupo de los mármoles se incluyen todas las rocas constituidas por minerales ricos en carbonatos, con dureza entre 3 y 4, de acuerdo con la escala de Mohs, calcita y fluorita, respectivamente. En este intervalo de dureza están los mármoles en sentido estricto, las calizas cristalinas, los travertinos y otras variedades calcáreas. También se incluyen en tal categoría las serpentinitas, que a pesar de ser rocas metamórficas, comercialmente se conocen con el nombre de *mármol verde*. Las rocas del grupo de los mármoles presentan por lo regular resistencias inferiores a los 1000 kg/cm^2, pero superiores a los 400 kg/cm^2, y se consideran con una dureza intermedia o semidura.

El grupo de las metamórficas generalmente se denominan con el término de *pizarras* e incluyen a las mismas pizarras y filitas en el sentido geológico. Se caracterizan por partirse en lajas sin necesidad de ser someterlas a procesamientos de aserrados. Se utilizan para revestir fachadas y techar casas. Este grupo de rocas se caracteriza por presentar *dureza relativamente blanda*, con una resistencia a la compresión menor de 400 kg/cm^2 (40 MPa) (Pla y Herrera, 2002).

Existe un cuarto grupo en la anterior clasificación, denominado *piedras de cantería*, que comprende rocas sedimentarias clásticas como las areniscas, conglomerados, cuarcitas, alabastros (piedra de yeso), etc. Las areniscas están conformadas por minerales de cuarzo y, en menor proporción, por feldespatos, micas, óxidos de hierro y fragmentos de roca. Las cuarcitas se caracterizan por ser rocas metamórficas que presentan un contenido superior al 95 % de cuarzo, y generalmente son muy compactas. Esta propiedad implica una dureza alta, característica que hace difícil su aserrado.

Las piedras de cantería han adquirido gran importancia en la industria de rocas ornamentales, y su aplicación va en aumento. En Noruega, por ejemplo, los esquistos y las cuarcitas forman un sector diferenciado; en la región de Asturias (España), se explotan dos variedades de roca conocida como arenisca: jurásica gris y arenisco, jurásica amarilla. En Colombia, en el altiplano cundiboyacense se aprovechan las areniscas del grupo Guadalupe, del período Cretácico, especialmente las correspondientes a las formaciones Arenisca Dura y Arenisca de Labor, como piedra de cantería (piedra bogotana), para usos en fachadas y pisos, que han sido fundamentales en la construcción del patrimonio histórico colombiano (figura 6). En los

departamentos de Boyacá y Santander, la formación San Gil Superior (areniscas) se constituye igualmente en fuente potencial de depósitos de piedra de cantería.



Figura 6. Uso de areniscas en la construcción del patrimonio colombiano. Arenitas Fm. Simití en Puente Nacional

Fuente: Becerra *et al.*, Servicio Geológico Colombiano (2011)

2.1.2.1. Factores considerados para la evaluación de áreas de extracción de rocas ornamentales

Los depósitos o yacimientos de rocas con alto potencial para ser explotadas como material de ornamentación deben estar ubicados en sitios no lejanos a los centros de consumo y contar con vías de penetración en condiciones favorables para el transporte de los bloques, pues ello minimiza los costos por transporte, lo cual tendrá como resultado menores precios al consumidor y una rentabilidad acorde con las expectativas de la industria. La evaluación del potencial de un área determinada implica la evaluación de algunos factores fundamentales, como los siguientes:

- Tipo de recubrimiento (vegetal, suelo) y su espesor, factor importante debido al costo del descapote, que puede viabilizar o inviabilizar un área.
- Tamaño del área, infraestructura vial, tendidos de redes eléctricas, fuentes hídricas para el desarrollo de las actividades de extracción y control de elementos particulados. Estos factores inciden en forma positiva o negativa en la selección de áreas de interés, ya que determinan el rendimiento de las actividades de extracción y transporte, lo que genera ahorros o aumento de costos.
- Factores ambientales, considerando el impacto que las actividades extractivas van a tener sobre el medio físico (atmósfera, agua y suelo), el medio biótico y antrópico cercano a las posibles áreas de interés, y las modificaciones del paisaje, entre otros factores (figura 7). Igualmente, hay que tomar en cuenta la generación de residuos, su disposición y su reaprovechamiento para fines industriales. Un análisis cuidadoso permitirá determinar las mejores estrategias para el desarrollo de mina compatible con la conservación del medio ambiente, así como definir los indicadores y umbrales permitidos para que el proyecto pueda ser viable.
- Los aspectos legales y la tradición minera, aunque considerados factores externos, deben considerarse para que la explotación se sujete a la normativa establecida para el ejercicio de la minería en Colombia, según la Ley 685 de 2001, de modo que respete las disposiciones que rigen para los parques nacionales y las reservas de comunidades indígenas.



Figura 7. Ejemplos de manejo ambiental en canteras de roca ornamental. Arriba: cantera con extracción inadecuada y alta producción de residuos. Abajo: cantera organizada con adecuada disposición de residuos

Fuente: Becerra (2009)

2.1.2.2. Normativa sobre los ensayos de la piedra natural

La comercialización de las rocas ornamentales está sujeta a la normativa vigente en cada uno de los países con demanda del producto, que exigen los tipos de ensayos mínimos requeridos y las especificaciones necesarias para aceptar un producto y permitir su comercialización. Actualmente las normas EN, elaboradas por el Comité Europeo para Estandarización (CEN), son mundialmente las más importantes en el comercio de rocas ornamentales, si se considera que algunos de los mayores productores y compradores de este tipo de rocas son países europeos (Italia, España y Portugal). Estas normas son de cumplimiento obligatorio para la aceptación de productos que pretendan comercializarse en los países miembros de la Comunidad Económica Europea, y han sustituido las antiguas normas nacionales de los países miembros. También son importantes las normas ASTM de Estados Unidos, de aplicación generalizada en el continente americano, y las normas ABNT de Brasil, sexto mayor productor mundial y gran mercado potencial de rocas ornamentales para los países de América Latina. Hay una tendencia a trabajar en una política de estandarización, siguiendo el ejemplo de la Comunidad Económica Europea, para unificar la normativa vigente con el concepto de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por su sigla en inglés), creada en 1947, que es la federación que agrupa a los organismos nacionales de normalización de la mayoría de los países pertenecientes a distintos continentes.

Básicamente, se puede decir que para el Comité Técnico ISO/TC 196, la piedra natural tiene un campo de actuación que abarca "La normalización en el dominio de las piedras naturales". Esta norma incluye la terminología, la clasificación, las exigencias de bloques, planchas, productos semielaborados y terminados, el muestreo, los métodos de ensayo y las exigencias de montaje y puesta en obra (López, 1996).

De acuerdo con los procedimientos internos de trabajo del Comité Europeo de Normalización (CEN) para el desarrollo y elaboración de las normas europeas (EN, por su sigla en inglés), un comité técnico (TC, por su sigla en inglés) crea subcomités (SC) y grupos de trabajo (WG, por su sigla en inglés) encargados de elaborar los paquetes de normas en el campo de actividad del TC. Los pasos que se siguen en la elaboración de una norma son los siguientes: trabajos preliminares, iniciación, elaboración de un borrador, encuesta interna, voto formal, fase de implementación de la norma UNE-EN que se adoptará y publicación para consulta.

Algunas de las normas armonizadas europeas son las siguientes:

Normas de ensayos de productos finalizados

- EN 12326-1. Pizarras. Parte 1. Especificaciones de producto.
- UNE-EN 12326-2. Pizarras. Parte 2. Ensayos.
- UNE-EN 1341. Baldosas de piedra natural para pavimentos exteriores. Especificaciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1342. Bordillos de piedra natural para pavimentos exteriores. Especificaciones y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1343. Adoquines de piedra natural para pavimentos exteriores. Especificaciones y métodos de ensayo.

Ensayos de caracterización de piedra natural

- UNE-EN 1925:1999. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 1926:1999. Determinación de la resistencia a la compresión.
- UNE-EN 1936:1999. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- UNE-EN 12370:1999. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales.
- UNE-EN 12372:1999. Determinación de la resistencia a flexión bajo carga concentrada.

2.1.2.3. Factores de mayor incidencia en el mercado de las rocas ornamentales

La elección de la roca ornamental como elemento constructivo y decorativo se debe a una serie de características que definen a este material, tales como las siguientes:

- Envejecimiento lento y ennoblecido.
- Fusión con la naturaleza de la que provienen. En determinados usos, es el único material factible de ser utilizado para minimizar los impactos ambientales (visuales), tan importantes hoy en día.
- Diversidad de texturas, colores y acabados. Existe un tipo de piedra con un acabado determinado y con un color dado. Lo importante es conocer todos estos factores a la hora de colocar una piedra natural en un determinado lugar.
- Exigencias de coherencia estética con edificaciones antiguas. Sería impensable construir con otro tipo de material en zonas donde históricamente la piedra ha sido el elemento constructivo (como el casco histórico de cualquier ciudad).
- Resistencia a la intemperie y durabilidad.
- Expresividad de la piedra.

- Aumento del nivel y exigencia de calidad de vida.
- Calidad, durabilidad y elegancia, los tres factores más positivos para utilizar rocas ornamentales en la construcción.

2.2. Tipo de depósito

El conjunto de los distintos tipos de rocas puede clasificarse genéticamente en tres grandes grupos: rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Las ígneas presentan una gran variedad y se clasifican, en función de su ambiente de formación, en plutónicas o intrusivas, y en volcánicas o extrusivas. Las metamórficas comprenden aquellas que han sufrido transformaciones al ser sometidas a condiciones físico-químicas diferentes de las que existían en el momento de su formación, por la acción de la presión y la temperatura en estado sólido o plástico. Las sedimentarias se originan por la transformación de una roca preexistente, ya sea ígnea, metamórfica o incluso sedimentaria, en detritos o fragmentos transportados y redepositados por medios fluviales, litorales, eólicos, glaciales y marinos.

2.2.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas o magmáticas son aquellas que se han formado por solidificación del material rocoso caliente y móvil llamado magma. Pueden consolidarse en el interior de la corteza y zonas profundas para constituir rocas plutónicas; o formarse cerca de la superficie, lo cual da origen a cuerpos ígneos denominados *hipoabisales*, que pueden ser de composición ácida, como las aplitas y pegmatitas, o de composición básica, como las diabasas; o pueden cristalizarse en la superficie terrestre al contacto con el agua y el aire, para formar rocas volcánicas. El magma se define regularmente como una roca en estado de fusión, que a su vez genera elementos volátiles que se pierden al solidificarse. Los principales elementos que componen las rocas ígneas son oxígeno, silicio, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio.

Las rocas ígneas con poco contenido de sílice (menos del 52 %), denominadas *rocas básicas*, son ricas en calcio, magnesio y hierro, y por lo general presentan una coloración predominantemente oscura. Las rocas ígneas ricas en sílice (mayor del 66 %), denominadas *rocas ácidas*, tienen alto contenido de sodio y potasio, y se caracterizan por sus colores relativamente claros. Las rocas con un contenido de sílice que fluctúa entre el 52 y 66 % se clasifican como intermedias, y están representadas por la diorita, la monzonita y la sienita. Otro grupo importante son las rocas ígneas ultrabásicas, caracterizadas por contener menos del 45 % de sílice y carecer de feldespatos y cuarzo. Las más representativas de este grupo son la dunita y la peridotita. La dunita es rica en olivino magnesiano, y la peridotita, en olivino. Estas rocas pueden contener otros minerales máficos y, dependiendo de su contenido, reciben igualmente el nombre asociado, por ejemplo peridotita de piroxeno (rica en piroxeno), peridotita de hornblenda (rica en hornblenda) y peridotita de mica (kimberlita).

Las rocas ígneas se presentan en la corteza terrestre de diferentes formas, dependiendo de los pulsos magmáticos ocurridos en el tiempo. La característica y naturaleza de la roca encajante por la cual se introduce el magma determinan la forma y el tamaño de la intrusión. Las rocas ígneas intrusivas pueden conformar depósitos o cuerpos como batolitos, lacolitos, *stocks*, diques y silos.

Cuando el magma, que se encuentra a mayores profundidades, se emplaza hacia profundidades menores, lo hace constituyendo plutones y batolitos, emplazamiento que generalmente alcanza las capas superiores de la corteza donde se solidifica. Estos depósitos llegan a ser expuestos en la superficie cuando las rocas suprayacentes se eliminan por procesos erosivos que terminan por conformar grandes extensiones de terreno. Un depósito tipo lacolito se constituye cuando se consolida una masa magmática en forma de cúpula, de piso plano y techo arqueado hacia arriba.

Un dique es una masa ígnea tabular que entra en grietas o fisuras verticales de rocas preexistentes, y cuando se enfría semeja una roca con forma de muro, y aflora como un cuerpo relativamente angosto. Los diques varían en espesor de pocos centímetros a muchos metros, y usualmente consisten en rocas de composición básica y ácida. Por otra parte, cuando el magma se desplaza entre capas de rocas estratificadas, forma cuerpos ígneos dispuestos en aparente concordancia, y son denominados *sill* o *silos*.

Las rocas ígneas extrusivas, provenientes de un magma expulsado generalmente por un volcán, ya sea en forma de lava, fragmentos de roca, cenizas o gases, son también valoradas como rocas ornamentales. Se destacan las rocas de composición ácida, como las dacitas y riolitas, las intermedias como la andesita, y las básicas como el basalto (figura 8).

Se entiende por *lava* la parte del magma que ha alcanzado la superficie por medio de una erupción volcánica. El término se emplea principalmente para designar las corrientes de roca líquida que fluyen desde un cráter o fisura y que alcanzan su solidificación y enfriamiento rápidamente (figura 9).



Figura 8. Rocas ígneas extrusivas (andesita), utilizadas como rocas ornamentales

Fotografía: Jair Ramírez, SGC



Figura 9. Imagen de lava

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Rippled_Dry_Lava_Flow_%282386887888%29.jpg

Los "conos de ceniza" o de escoria son pequeños depósitos o montículos formados por la expulsión de rocas, arena y cenizas a través de orificios, se forman cuando por fracturas de la corteza se escapan gases y vapores a altas temperaturas, los cuales arrastran pequeñas partículas de roca que se acumulan como arenas y cenizas hasta formar una pequeña loma relativamente simétrica. Por lo general, estos conos son destruidos por la erosión o enterrados por lavas y lahares del volcán principal; sin embargo, algunos se han conservado intactos, como los del cerro del Panecillo; cerro de Callo, cerca del volcán Santa Cruz, y la loma de Araque, frente al volcán Huarmi Imbabura, en la república del Ecuador. Los conos de ceniza tienen forma de cono y no son muy grandes; por lo regular están constituidos por pilas de lava y no de ceniza, que forman un pequeño volcán de forma oval.

El cuello volcánico solidificado es aquel que en su momento de volcán activo era la chimenea por donde se expulsó parte del magma. Algunos de estos cuellos volcánicos han sido tan erosionados que se levantan como verdaderos obeliscos naturales, como se puede apreciar especialmente en el desierto de Arizona, en Estados Unidos (Hinojosa, 2005). En Colombia, el volcán Galeras conforma un típico cono volcánico.

2.2.2. Rocas metamórficas

Son aquellas rocas formadas por transformaciones físicas o químicas cuando son sometidas a cambios de temperatura y presión, lo cual origina un reordenamiento de los minerales primariamente constituyentes, al igual que una recristalización de estos, que da forma a nuevos minerales. Las rocas metamórficas son el producto de la transformación de cualquier tipo de roca llevada a un ambiente en el que las condiciones físicas (presión y temperatura) son diferentes de aquellas en las que la roca se formó. En esos ambientes, los minerales pueden tornarse inestables y reaccionar para formar otros minerales, estables en las condiciones vigentes. No solamente las rocas sedimentarias e ígneas pueden sufrir metamorfismo: las propias rocas metamórficas también pueden experimentar un nuevo metamorfismo, que dará origen a una nueva roca metamórfica con diferente composición química o física de la roca original.

De acuerdo con las condiciones de temperatura y presión, se producen diferentes grados de metamorfismo, clasificados como muy bajo, bajo, medio y alto. El metamorfismo puede tener lugar en una gran variedad de ambientes dentro de la corteza, por lo que es conveniente identificarlos y establecer su grado, para situar y predecir la aparición de rocas ornamentales, como pizarras, mármoles y otras rocas. Los tipos de metamorfismo se podrían dividir en dos concepciones: uno de extensión con carácter local, y otra de extensión con carácter regional. Así, se establece un metamorfismo de contacto, o térmico, otro denominado *dinámico* o *cataclástico*, otro más llamado *hidrotermal local* y, por último, el metamorfismo regional (López, 1996).

Las principales rocas metamórficas usadas como rocas ornamentales son los neises, serpentinitas, cuarcitas, mármoles, pizarras, esquistos, filitas, migmatitas, anfibolitas, eclogitas y granulitas.

2.2.3. Rocas sedimentarias

La formación de una roca sedimentaria comienza en general con la disgregación de una roca preexistente, ya sea metamórfica, ígnea o sedimentaria, para formar fragmentos de diversos tamaños, como consecuencia de la meteorización y alteración química de la roca. Estos detritos o fragmentos, al ser transportados, se redepositan en cuencas sedimentarias para formar depósitos de sedimentos. Posteriormente, mediante procesos diagenéticos (compactación del sedimento, reducción de la porosidad, cementación, etc.), se transforman en roca, en respuesta a las condiciones ambientales presentes durante el enterramiento. Existen otras clases de rocas sedimentarias, cuya génesis no necesita la formación de un detrito ni su posterior transporte; unas son rocas originadas por precipitación química, y otras, de origen orgánico (López, 1996).

Entre las rocas sedimentarias clásticas o detríticas están los conglomerados, las arenitas cuarzosas (areniscas), arcosas, grauvacas, limolitas y arcillolitas, mientras que entre las rocas sedimentarias no clásticas, por precipitación química, están las calizas, las dolomitas, los yesos, la sal gema, los alabastros, el sílex, los fosfatos inorgánicos y los depósitos de hierro y manganeso. Por último, entre las rocas de origen orgánico están las rocas silíceas y fosfáticas orgánicas, formadas por acumulación de restos orgánicos, cementadas por carbonatos de precipitación química, y los carbones.

Las arenitas de cuarzo o areniscas se caracterizan por tener un tamaño de grano que está entre los 0.0625 y los 2 mm de diámetro, generalmente englobados en una matriz constituida por cuarzo, hierro, óxidos y calcita. El cemento de cuarzo es una condición para la aptitud como roca ornamental, pero si esta es muy compacta y dura, puede ser inconveniente para su aserrado, por costos, por lo cual en ocasiones son descartadas para este uso. Se puede decir que las areniscas cuarzosas de grano fino y homogéneo son las más apropiadas como material de revestimiento.

Según F. W. Clarke, existen cerca de 370 km^3 de rocas sedimentarias, que representan el 5 % del volumen total de la corteza terrestre (López, 1996).

Las calizas, como piedra ornamental, involucran calizas fosilíferas, bioclásticas, lumaquélicas, nodulosas rojas, oolíticas y lacustres. Por otra parte, el travertino se define como una piedra calcárea, que se forma con los ciclos de agua y carbono de la tierra. A medida que las aguas pluviales ricas en dióxido se filtran a través del suelo y de la roca, las aguas disuelven lentamente grandes cantidades de caliza por medio de fisuras subterráneas. Esto da origen **a** un proceso que forma una roca carbonatada, densa y bandeada. El 99 % de los minerales que lo integran son incoloros (calcita y yeso), y el 1 % restante corresponde a trazas de azufre amarillo, compuestos de hierro pardo y pigmentos orgánicos, que le dan el color miel característico. Además, la textura intrincada, como oquedades, es el resultado de burbujas de gas que quedan atrapadas y que producen huecos redondos o esféricos.

2.3. Métodos de prospección

La metodología comúnmente aplicada en la investigación de los yacimientos de roca ornamental es singular y comprende cinco fases, que van desde la recopilación bibliográfica inicial hasta la apertura de la cantera. Sin embargo, el contenido de cada una no es unívoco ni cerrado, y al final es el propio yacimiento el que marca la pauta, especialmente en relación con las escalas de trabajo, naturaleza de los reconocimientos y técnicas que hay que emplear (López, 1996; Pla y Herrera, 2002) (figura 10).

Según López (1996), las actividades que comprende cada una de las fases del trabajo de investigación para canteras de rocas ornamentales son las siguientes:

2.3.1. Fase 1. Recopilación de información y bibliografía

Se recoge y analiza toda la información geológico-minera disponible acerca de la roca y de la zona que se va

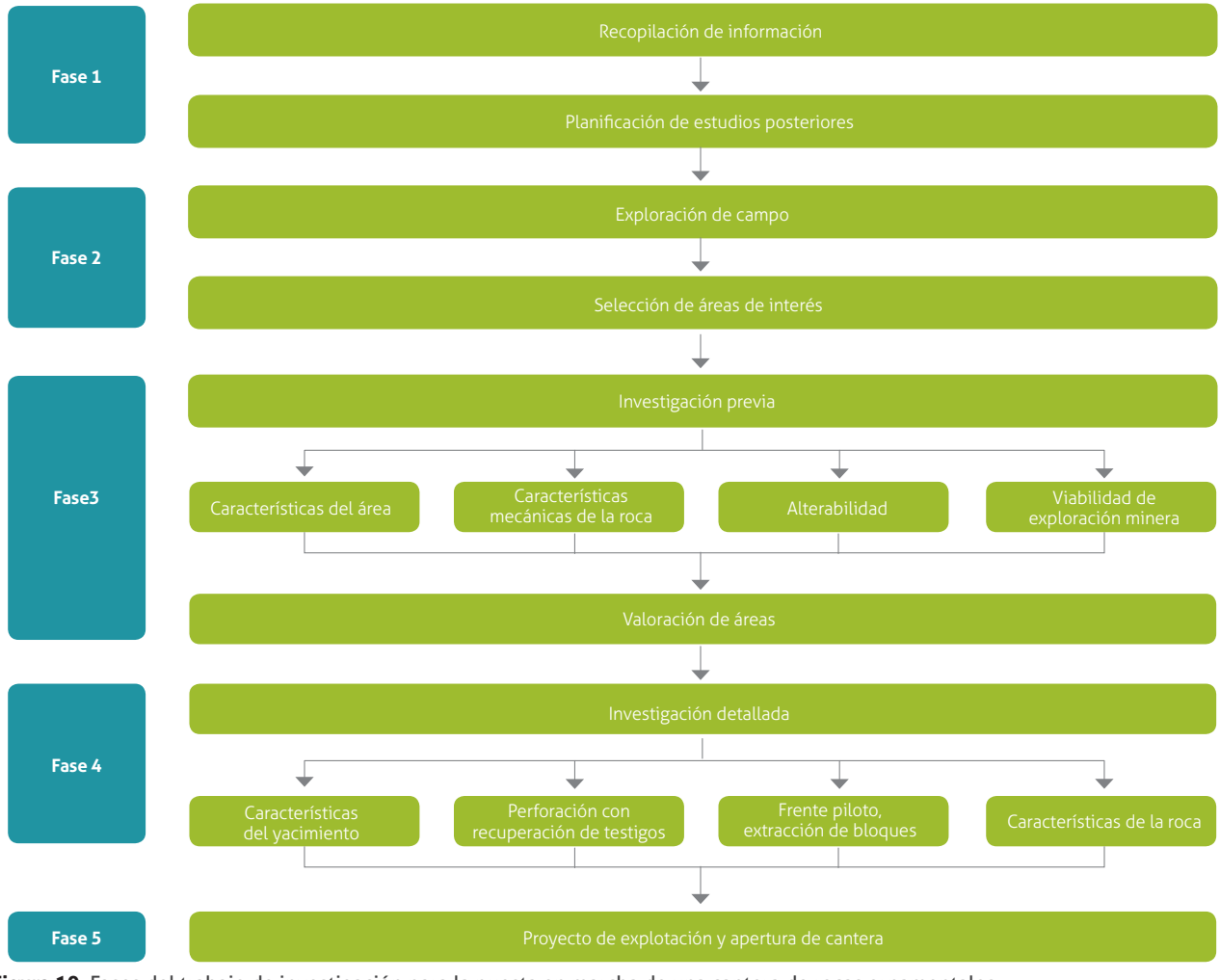


Figura 10. Fases del trabajo de investigación para la puesta en marcha de una cantera de rocas ornamentales

Fuente: López (1996)

a explorar, como cartografías temáticas, estudios locales y ambientales, tesis doctorales, datos de canteras, vías, fotografías aéreas y restricciones. Con esta información se hace una selección preliminar de las zonas de interés y se planifican los estudios que hay que efectuar. En esta primera fase suele hacerse la cartografía a una escala de entre 1:50 000 y 1:200 000.

2.3.2. Fase II. Exploración de campo

Durante esta fase se llevan a cabo visitas de campo, se toman muestras preliminares y se efectúa un inventario de todos los datos de interés seleccionados con base en las fuentes bibliográficas. Se recopila la mayor cantidad de datos posible, que se ponderará para seleccionar nuevas zonas de interés, que se investigarán en la siguiente fase. En esta fase se sugiere utilizar escalas de entre 1:25 000 y 1:50 000.

2.3.3. Fase III. Investigación previa o semidetallada

En las zonas previamente seleccionadas se lleva a cabo una exploración con mayor detalle, y se analiza todo lo referente a características del área, características geológicas de la roca, características mecánicas de la roca y calidad, alterabilidad potencial, viabilidad de la explotación minera y selección de áreas de mayor interés que pasarán a la siguiente fase de investigación.

En esta fase los trabajos cartográficos se llevan a cabo a escalas de entre 1:10 000 y 1:25 000.

2.3.4. Fase IV. Investigación de detalle

En esta fase las áreas de mayor interés, seleccionadas en la fase anterior, se investigan con detalle para señalar los sitios más favorables para la extracción industrial de la roca. Se enfatiza en la determinación de las características de la roca que le den valor comercial y que pueden llegar a condicionar la explotación del yacimiento, como la vistosidad, el color, tamaño del grano, homogeneidad, presencia de alteraciones y oxidaciones, resistencia mecánica, fracturación de la roca y del macizo, foliaciones. Para poder realizar estas actividades es necesario hacer las siguientes actividades complementarias: determinar las características del yacimiento, realizar sondeos con recuperación de testigo, abrir un frente piloto para extracción de bloques, establecer las características de la roca y hacer un levantamiento topográfico del yacimiento seleccionado.

Durante el desarrollo de esta fase se suele efectuar la cartografía a escalas de entre 1:1000 y 1:10 000.

2.3.5. Fase V. Proyecto de explotación y apertura de la cantera

Se considera que los datos obtenidos en las fases anteriores son suficientes para alcanzar una confiabilidad geológica que ponga de manifiesto la viabilidad técnico-económica de la explotación de la roca. Como norma general, siempre que se investiga un área en cada una de las fases, los aspectos que se van a determinar son, fundamentalmente, los siguientes:

2.3.5.1. Propiedades específicas de los afloramientos

- Fracturación del depósito
- Características de la roca
- Composición litológica
- Color y variaciones de color
- Tamaño de grano
- Karstificación y meteorización en rocas carbonatadas
- Plegamientos o repliegues internos
- Metamorfismo (en su caso) o recristalizaciones
- Textura
- Homogeneidad
- Cambios de facies
- Presencia de discontinuidades
- Vetas y concreciones
- Impurezas
- Oxidaciones
- Otras alteraciones

2.3.5.2. Factores condicionantes de la explotabilidad

- Tamaño del afloramiento
- Recubrimientos
- Topografía y accesos
- Impacto ambiental que pudiera ocasionar la cantera
- Existencia de explotaciones próximas
- Infraestructura industrial

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

En la actualidad, la extracción de rocas ornamentales se desarrolla a cielo abierto y subterráneo. En la minería a cielo abierto, denominada genéricamente *cantera*, se emplean técnicas de explotación que dependen de las condiciones geomorfológicas del terreno.

2.4.1. Sistemas de explotación

A continuación se hace una descripción de los diferentes sistemas de explotación.

2.4.1.1. Canteras a cielo abierto

En este sistema se agrupan todos los trabajos que se desarrollan sobre superficies relativamente planas. De acuerdo con las características del acceso y la técnica de extracción, se clasifican así:

- **Canteras en foso y extracción por grúas.** Son explotaciones totalmente confinadas por taludes laterales verticales o subverticales en las que la extracción de bloques y estériles se realiza con grúas, en tanto que el personal accede al lugar por medio de escalas ancladas en los paramentos.
- **Canteras en foso y rampas de acceso.** Se construyen con materiales estériles, con el fin de conectar entre sí los diferentes niveles de extracción de la cantera. Es la más frecuente por su mayor versatilidad.
- **Canteras en ladera sobre terrenos en pendiente.** Son aquellas que se ejecutan en media ladera. En muchos casos la extracción comienza por los niveles inferiores, y va aumentando la altura y el número de bancos del frente de explotación. En otros casos se empieza por los bancos superiores y se profundiza verticalmente.
- **Canteras de nivelación en terrenos montañosos.** Están emplazadas en lo alto de un cerro o promontorio natural, donde la extracción conduce a la nivelación con el terreno adyacente, tanto por la propia extracción como por el relleno de vaguadas con los estériles producidos.

2.4.1.2. Minería subterránea

Este método se utiliza cuando se requiere la remoción de grandes volúmenes de roca estéril suprayacente al material útil. La explotación se hace mediante el método de cámaras y pilares, en desarrollo del cual las labores se inician con la apertura de una galería en dirección de la explotación, con pilares de sustentación que aseguren la estabilidad. Presenta varias ventajas económicas, por permitir el ahorro de costos de extracción cuando la explotación se hace en terrenos abruptos o con recubrimientos de estériles muy potentes; ventajas medioambientales, por ser menor el impacto sobre la morfología del paisaje, y ventajas climatológicas, por facilitar la extracción continua en cualquier condición climática.

2.4.2. Procesamiento del material

A continuación se hace una descripción de los diferentes sistemas de procesamiento de las rocas ornamentales.

2.4.2.1. Sistemas y técnicas de arranque

En la selección de los equipos para iniciar los procesos de arranque se consideran algunos factores intrínsecos de las rocas, como la resistencia a la compresión, dureza, tenacidad, porosidad y abrasividad, que contribuyen a definir la técnica adecuada de arranque y el equipo apropiado para la extracción. Se ha establecido que estos procesos son bastante similares para aplicarlos a cualquiera de las tres variedades de los grupos comercialmente explotables.

El arranque consiste en la separación primaria en el macizo rocoso de un primer bloque, entendiendo por *bloque* una figura geométrica más o menos cúbica, y con unas dimensiones tales que los equipos de carga y transporte seleccionados puedan manipularlo u operarlo en unas condiciones de productividad óptimas.

El bloque primario se somete a unas sucesivas etapas de subdivisión, hasta alcanzar una dimensión que permita un manejo adecuado en el taller de corte y aserrado, y al mismo tiempo dentro de las gamas y tolerancias que requiere actualmente la industria de transformación. Las dimensiones finales que se dan a continuación corresponden a los bloques estándar de mármoles y granitos que se venden. Las más usuales en el comercio son estas:

Longitud: 1.90-3.30 m, ancho: 1.00-1.50 m, altura: 0.90-1.20 m, volumen: 2.00-6.00 m^3 y peso: 10-20 toneladas.

Con estos parámetros, los más apreciados y mejores pagados son los de mayor tamaño, los de mejor escuadrado y los que presentan mejor acabado de las caras, ya que estos factores implican un mejor rendimiento de transformación en los aserraderos. En general, alcanzan unos volúmenes de 6 m^3 y hasta 20 toneladas de peso, y se pueden comercializar y exportar en esas condiciones a grandes distancias, debido a sus altos precios.

2.4.2.2. Técnicas de corte

Generalmente, en la extracción de rocas ornamentales se usan en conjunto varias técnicas de corte, tratando siempre de utilizar aquella que produce menores costos y mejores acabados. Es importante tener en cuenta el parámetro de abrasividad, que es el factor que en definitiva delimita, en términos económicos, la selección del sistema de corte más adecuado.

Los sistemas o técnicas de corte más aplicados en la actualidad son los siguientes:

- Perforación de barrenos próximos con voladura o sin ella
- Hilo helicoidal y diamantado
- Rozadora de brazo
- Disco de corte
- Lanza térmica
- Chorro de agua
- Utilización de cuñas manuales e hidráulicas

A continuación se da una breve explicación de cada una de estas técnicas:

Perforación de barrenos próximos con voladura o sin ella. Esta técnica consiste en la apertura de barrenos de pequeño diámetro, dispuestos muy próximos y paralelos para poder producir un corte a través del plano constituido por los mismos barrenos, mediante acción, bien sea de una presión hidráulica o mecánica adicional, o por la acción de pólvora, cordón detonante o arcillas expansivas (figura 11).



Figura 11. Esquema de arranque por perforación de barrenos

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/Auger_Foundation_Pile_Drill_Rig.jpg

Este sistema se aplica fundamentalmente sobre las rocas de mayor dureza y abrasividad (grupo de los granitos). Su aplicación en rocas diferentes de los granitos es inadecuada debido al gran volumen de producción de residuos producidos, menor calidad de los bloques producidos y su menor recuperación.

Se han hecho notables avances tecnológicos en esta técnica de extracción, gracias a la sustitución de la perforación neumática por la hidráulica, con una operación centralizada de las baterías, que permite el control de varias baterías en paralelo por un solo operario en condiciones de mayor productividad, menores consumos energéticos y un menor impacto ambiental derivado de los ruidos y el polvo, y que posibilitas obtener un mejor paralelismo entre los barrenos.

La operación se inicia con el corte de un gran bloque, cuyo volumen puede estar entre los 100 y los 4000 m^3. En una segunda etapa, sobre el gran bloque extraído se realiza la subdivisión en bloques de menor tamaño, en el mismo sitio de la cantera. Los parámetros de perforación son similares, aunque las fases sucesivas de división del bloque exigen un cuidado mayor para una mejor terminación de las caras. El volumen de los nuevos bloques obtenidos oscila entre los 18 y 100 m^3. Para la ejecución del volcamiento de estos grandes bloques cuando se han individualizado es necesario disponer de un "lecho" de arena y fragmentos existentes, o en su defecto de un colchón de goma inflable que amortigüe la caída y evite rupturas o fracturaciones.

Los sistemas más empleados para volcar los bloques pueden ser tracción mediante cabestrante o grúa torre (*derrick*), empujadores hidráulicos en el plano posterior, carga de pólvora en el plano posterior y extracción con palas o carretillas elevadoras con un acoplamiento idóneo.

Continuando con las actividades se llega a la fase III, en la que se desarrollan nuevas subdivisiones de los bloques anteriores, de tal manera que estos sean más manipulables por los equipos de la cantera. El volumen general de estos bloques debe ser de unos 10 m^3, que facilita el manejo y transporte a los talleres. Asimismo, estos bloques deben alcanzar las dimensiones adecuadas para su comercialización, ya sea en bruto o elaborado, teniendo en cuenta la calidad de la roca y la tolerancia final exigida por el mercado. La calidad del acabado de las caras del bloque final depende del correcto alineado de la perforación, así como de la separación y diámetro de los barrenos. Es casi imprescindible que estas imperfecciones no existan, ya que derivan del sistema en sí mismo. Tal situación supone unas pérdidas en detritus estimadas en unos 25-50 mm por cada una de las caras del bloque.

El empleo de la técnica de perforación por barrenos próximos requiere una óptima distribución de la energía generada por el explosivo sobre el plano de fractura, de tal manera que evite la aparición de tensiones máximas o diferenciales que pueden producir fracturación tanto de la roca volada como del macizo. El éxito de la voladura se traduce en una gran precisión en la geometría del bloque, al igual que en unos daños mínimos a este y a la roca remanente, y depende tanto del esquema de perforación como de la calidad de los barrenos y de las cargas de explosivo.

La utilización de los explosivos tiende a decrecer por las grandes pérdidas que implica su uso, ya que no garantizan

porcentajes elevados de recuperación, lo cual genera altos volúmenes de residuos y un marcado impacto ambiental.

Hilo helicoidal y diamantado. Este sistema se aplica a las rocas de dureza media a baja, fundamentalmente a los mármoles, travertinos, piedras calizas y pizarras. Desarrollado en Italia a principios del siglo XIX, supuso en su momento un extraordinario avance en la técnica del arranque de las rocas ornamentales, que hasta entonces continuaba con los mismos sistemas manuales de la antigüedad, y dio a los productores italianos una posición de dominio en el mercado mundial que han sabido conservar comercialmente hasta la fecha.

El hilo helicoidal consta de un motor de 250 HP que mueve un cable conformado por tres hilos acerados entorchados que se guían mediante poleas hacia el bloque que se va a trabajar, y se le agrega un material abrasivo con agua, que actúa como elemento cortante. El recorrido de este cable se realiza sobre un grupo de poleas pequeñas en una extensión de 1500 m, con el fin de permitir el tiempo necesario para su refrigeración. Uno de sus inconvenientes es el desgaste prematuro del cable y de todo el aparataje que implica la disposición de las poleas y el tendido de cable para la extracción.

La introducción del hilo diamantado hace algunos años posibilitó el aumento de los rendimientos de extracción y el ataque de rocas más duras, como el granito y algunas rocas metamórficas. Este sistema consiste en un motor acoplado a un chasís, que se monta sobre rieles. Al motor se le engrana una polea que genera la rotación de un hilo diamantado con una longitud de 10 a 20 m. El corte de la roca se produce por el desplazamiento de la estructura que presiona el hilo sobre el macizo y que combina el corte por rotación (figura 12). Se requiere igualmente la elaboración de dos barrenos perpendiculares, que se emplean para iniciar el corte de los bloques.



Figura 12. Corte vertical simple usando la técnica de hilo diamantado. Formación La Tampa. Eoceno Medio (Colombia)

Fuente: Becerra (2009)

Corte con rozadora de brazo. Este sistema se aplica en aquellos macizos rocosos de dureza media a baja, menor a 100 Mpa y con contenidos bajos de cuarzo. Es apropiado para las rocas ornamentales del grupo de mármoles.

Para el uso de este sistema, altamente mecanizado, se requiere disponer de alturas de banco limitadas por el alcance del brazo cortador. Su uso está condicionado a la existencia y orientación de las discontinuidades naturales, así como a las exigencias en el tamaño de los bloques vendibles; sin embargo, esto permite obtener desde un principio unos bloques finales, lo que elimina las sucesivas fases de subdivisión que implican los sistemas descritos anteriormente (figura 13).

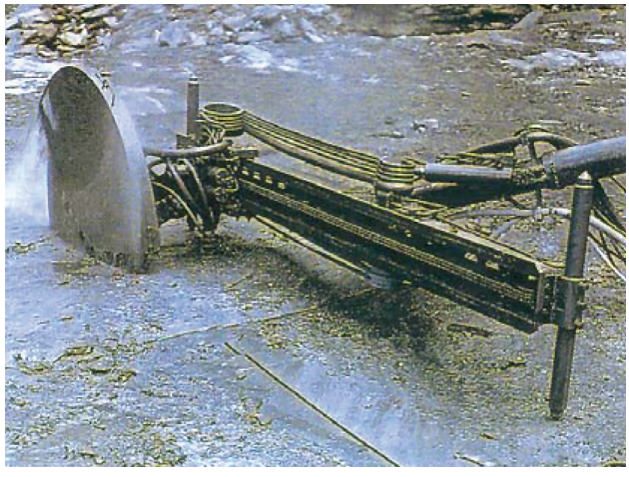


Figura 13. Fotografía de corte con rozadora de brazo

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas (2017)

Hasta hace unos pocos años este sistema se utilizaba más en los talleres de corte y aserraderos que en las canteras, pero su desarrollo montando unidades de mayor potencia y longitud del brazo en bastidores de maquinaria móvil o sobre rieles ha permitido su introducción en las canteras, aunque es natural que se necesite un adecuado estudio de selección y de ensayos antes de esta aplicación.

Corte con disco. El uso de este sistema permite obtener desde el principio los bloques sin necesidad de recurrir a las sucesivas etapas de división y acabado. No obstante, presenta grandes limitaciones de aplicación por la escasa profundidad de corte y, por tanto, de reducidas dimensiones de los bloques, lo cual obliga a un diseño previo muy ajustado de los bancos de trabajo.

Su limitación viene dada por esta fórmula:

$h = 0.5\ (D\text{-}d)$ cm, donde D = diámetro exterior del disco, y d = diámetro interior del disco.

Desde los puntos de vista económico y técnico, es el equipo más favorable, tanto por su simplicidad como por su menor consumo energético, pero estas ventajas no compensan, en muchos casos, las limitaciones descritas con anterioridad, por lo cual su uso sigue siendo más generalizado en los talleres de aserrado que en las canteras, aunque al revisar el diseño geométrico de estas se advierte que podría utilizarse más. Otra limitación en el empleo de este equipo tiene que ver con la configuración de la explotación, por la necesidad de disponer de amplias plataformas, al menos de 200 x 200 m, de modo que se puedan hacer largos cortes sin tener que mover el equipo, y la inclinación de la plataforma debe ser menor de 10°. Se aplica preferentemente en el corte de mármoles y de piedras calizas, pero también se utiliza para cortar rocas del grupo de pizarras de techar o losas de pizarras y de areniscas. El equipo utilizado consiste, básicamente, en un disco giratorio cortador con el filo de acero diamantado, y que puede desplazarse montado sobre un carretón móvil que se mueve paralelamente, sobre carriles.

Corte con lanza térmica. Este sistema se aplica exclusivamente en aquellas rocas de origen ígneo (granitos, dioritas y otras), cuyos contenidos de sílice alcanzan determinados niveles, y también en operaciones muy concretas y complementarias, como la ejecución de rozas iniciadoras, siempre que el material tenga unas características adecuadas de decrepitabilidad (*spallability*), por salto térmico entre el calor y el frío, inmediato y posterior.

El corte con lanza térmica (*flame jet*) es una técnica que depende fundamentalmente de la capacidad de una roca de fracturarse en escamas en presencia de una fuente de calor, por la diferencia de conductividad térmica de los minerales constituyentes de la roca; entre estas se encuentran el cuarzo, el feldespato y la mica. Tal característica se denomina *factor de decrepitabilidad* o *spallability*, y es una función del contenido de SiO_2.

El sistema consta de una lanza de longitud variable, de acuerdo con la longitud de la zona que hay que cortar, por cuyo interior discurren tres canalizaciones concéntricas de combustible, oxidante y agua, que desembocan en una tobera o cámara donde se produce la combustión. Las ondas de choque térmico generadas por la combustión son conducidas al exterior a través de una tobera a velocidades supersónicas, que producen el proceso de calentamiento, con posterior e inmediato enfriamiento por la salida del agua o vapor procedente de la refrigeración y por los gases de escape, para producir posteriormente, por el fuerte contraste térmico, la fracturación y la expulsión de los componentes del granito en granos diferenciales en forma de decrepitación. Este método tiene desventajas ambientales, por su elevado nivel de ruido, y tecnológicas, por no ser suficientemente económico, y porque la roca presenta baja calidad en la cara de corte, afectada por fisuras y vitrificación, ambos aspectos indeseables.

Corte con chorro de agua. El empleo del chorro de agua a alta presión y velocidad se ha usado tradicionalmente en la minería de tipo aluvial del estaño, del carbón, de los caolines y de las arcillas cerámicas, entre otros. La aplicación de esta tecnología en las rocas ornamentales está ligada al desarrollo de unos equipos hidráulicos de potencia adecuada, robustos y fiables. Existen hoy en día aplicaciones para el corte de vidrio, cerámicas, papel y otros materiales más resistentes, como el aluminio y el acero.

El equipo consiste básicamente en una pequeña central hidráulica iniciada por un motor eléctrico, y acoplada a una bomba hidráulica de alta presión, que acciona a su vez un intensificador de presión constituido por un pistón de doble efecto y un movimiento alternativo, capaz de realizar entre 60 y 80 ciclos por minuto. El efecto intensificador se consigue por la diferencia relativa de superficies activas del pistón, uno de los cuales impulsa finalmente el agua a través de una fina boquilla inyectora, constituida de zafiro sintético y cuyo diámetro oscila entre 0.1 y 1 mm.

El mecanismo de rotura de la roca, debido al finísimo chorro de agua a alta presión, se produce por efecto del choque de este chorro y las microfracturas creadas en consecuencia. Con una velocidad de 300 m/s, la presión creada es de unos 150 Mpa, superior a la resistencia a la compresión de muchas rocas. Con 500 m/s se pueden alcanzan valores de 300 Mpa, superiores a la resistencia de la mayoría de los materiales rocosos.

La aplicación de esta técnica puede suponer un avance importante en los sistemas de corte, por lo que actualmente se investiga el uso de mayores presiones y la respuesta de diferentes tipos de roca.

En la tabla 2 se resumen las técnicas de extracción y corte aplicadas en los diferentes tipos de rocas ornamentales.

Tabla 2. Técnicas de extracción y corte de rocas ornamentales

Roca ornamental	Sistema						
	Perforación	Hilo helicoidal		Rozadora de cadena	Disco diamantado	Lanza térmica	Chorro de agua
		Acero	Diamantado				
Granito	P	I	D	I	M	M y P	D
Mármol	P	P	P	P	P	I	D
Pizarras	P	P	P	P	P	I	D

P = posible, M = marginal, I = imposible, D = en desarrollo.

Fuente: Pla y Herrera (2002)

2.5. Recursos, reservas y comercio

Según Montani (2015, en IGME, 2016) la extracción mundial de rocas ornamentales aumentó un 3.85 % en 2014, hasta alcanzar 103.5 millones de m^3 (en bruto, incluyendo los desechos de la producción). Calculado con base en placas de 2 cm grosor, correspondería a 1500 millones de m^2. Visto a largo plazo, el sector muestra una tendencia positiva: en los últimos veinte años, el comercio internacional de piedra se ha cuadriplicado. La tabla de los grandes productores muestra que, esencialmente, los gigantes del sector son China, India y Turquía. Es destacable el hecho de que aumenta continuamente en el comercio internacional la parte que corresponde a productos acabados. En la tabla 3 se observan las producciones mundiales de rocas ornamentales en miles de toneladas en el periodo 1996-2014.

Tabla 3. Producción mundial de rocas ornamentales, periodo 1994-2014

País	1996		2013		2014	
	Prod (kt)	%	Prod (kt)	%	Prod (kt)	%
China	7500	16.10	39 500	30.40	42 500	31.10
India	3500	7.50	19 500	15.00	20 000	14.70
Turquía	900	1.90	12 000	9.20	11 500	8.40
Brasil	1900	4.10	9000	6.90	8750	6.40
Irán	2500	5.40	6500	5.00	7000	5.10
Italia	8250	17.70	7000	5.40	6750	4.90
España	4250	9.10	5000	3.80	4850	3.60
Egipto	1000	2.20	3000	2.30	4200	3.10
Portugal	1950	4.20	2650	2.00	2750	2.00
Estados Unidos	1350	2.90	2750	2.10	2650	1.90
Grecia	1800	3.90	1250	1.00	1300	1.00
Arabia Saudí	250	0.50	1200	0.90	1300	1.00
Francia	1150	2.50	1050	0.80	1200	0.90
Paquistán	200	0.40	1000	0.80	1000	0.70
Otros	10 000	21.50	18 600	14.30	20 750	15.20
Total	46 500	100.00	130 000	100.00	136 500	100.00

Fuente: Montani (2005, citado en IGME, 2016)

El mayor consumo de rocas ornamentales, según estimaciones de Montani (2015, en IGME, 2016) está encabezado por China, muy por encima de India, EE. UU., Brasil, Italia, Corea del Sur, Alemania y Turquía, a los que se les atribuye más de dos millones de toneladas en 2014, como se ve en la tabla 4. Les siguen Francia, Taiwán, España, Japón, Canadá y Bélgica con un consumo superior o cercano a un millón de toneladas anuales.

Tabla 4. Exportaciones internacionales de materiales lapídeos, en bruto y elaborados

Evolución del consumo de rocas ornamentales (kt)								
País	**1994**	**2001**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
China	2238	3964	11 601	14 533	16 537	19 354	22 180	21 704
India	983	1997	4459	4712	5106	5656	5708	6051
EE. UU.	1220	2889	3835	4009	3849	4157	4715	5368
Brasil	779	668	2274	2313	2688	2767	3294	3230
Italia	2700	3231	3205	3232	3084	2676	2425	2397
Corea del Sur	767	1371	2585	2679	2838	2401	2621	2311
Alemania	1837	2328	1670	1503	2008	1700	1750	2065
Turquía	221	578	1821	1611	1551	1592	1753	2026

Fuente: Montani (2005, en IGME, 2016)

En cuanto al consumo per cápita, y según la misma fuente, a la cabeza están Suiza, Bélgica y Arabia Saudí, con más de 1500 metros cuadrados por cada 1000 habitantes. Les siguen Taiwán, Corea del Sur, Italia, Portugal y España, con más de 500 metros cuadrados por cada 1000 habitantes. Y con cifras algo inferiores, Francia, Reino Unido y Alemania.

Las principales aplicaciones finales del producto elaborado se reflejan en la siguiente figura.

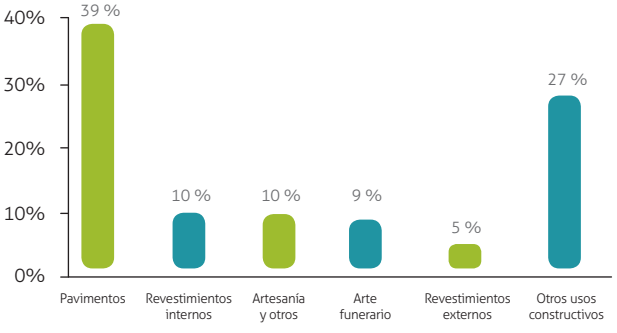


Figura 14. Principales usos de las rocas ornamentales a escala mundial

Fuente: IGME (2016)

Se constata un aumento considerable del comercio de las rocas ornamentales en todo el mundo, aunque las cifras disponibles son dispares por la heterogeneidad de los datos disponibles.

Según la asociación Internazionale Marmi e Macchine (IMM) (Internazionale Marmi e Macchine Carrara y Gussoni, 2015, en IGME, 2016), la piedra natural registró un comercio mundial de 86 millones de toneladas (+ 7.4 % respecto a 2013), por un valor de 22.8 billones de euros (+ 1.8 %), con una estabilización de las cuotas de mercado entre los diez primeros países, pero con interesantes variaciones en los porcentajes. China mantiene la mayor cuota del mercado internacional con un 35.8 % del valor total (principalmente comercia con Japón y los países de la zona), seguido por Italia con un 13.5 %, que cuenta con un mercado estable en términos de productos terminados de alto valor añadido. Turquía, el tercero en el mercado, con un 12.1 % (baja consistentemente en comparación con el 12.9 % de 2013), seguido por la India (10.8 %) y Brasil con 7.0 %. España, con un 4.4 % del valor de las exportaciones mundiales en 2014, ocupa la sexta posición.

Según Internazionale Marmi e Macchine Carrara y Gussoni (2015, en IGME, 2016), por países, China exportó en 2014 un total de 4.6 billones de euros (+ 5.6 % comparado con 2013). El segundo puesto mundial lo ocupa firmemente Italia, que exportó 4.2 millones de toneladas por un valor de más de 1.9 billones de euros, con reducciones en cantidad y aumento de productos terminados con más valor. La firmeza de la posición italiana está respaldada en gran medida por su tecnología puntera.

China también es un importante importador, con 14.7 millones de toneladas (igual que en 2013 por la caída de la demanda interna) procedentes principalmente de Turquía. El segundo mayor mercado es el de los Estados Unidos, con importaciones cercanas a los 2 billones de euros (+ 5 %). El mercado europeo muestra signos de recuperación, con unas importaciones por valor de 2.3 billones de euros (+ 0.3 %) para el conjunto de países de la Unión Europea, aún lejos de los 2.6 billones de 2012.

Según Montani (2015, en IGME, 2016), las exportaciones en toneladas han alcanzado un aumento del 6.7 % (en total, 56.9 millones de t). Los dos gigantes del sector fueron China e India. La mayoría de los grandes importadores también tienen peso como exportadores. En muchos casos importan bloques o placas, las elaboran y las exportan de nuevo en forma de productos más valiosos.

Tabla 5. Valor de las exportaciones por países en el periodo 2012-2014

Principales importadores en 2014 (euros)				
País	**2012**	**2103**	**2014**	**Var. %**
China	1 992 568 228	2 137 903 194	2 192 368 177	2.55 %
Estados Unidos	1 616 519 771	1 886 319 266	1 982 810 361	5.12 %
Japón	680 597 791	659 451 540	597 408 534	–9.41 %
Corea del Sur	574 100 001	524 964 655	569 628 515	8.51 %
Alemania	384 188 310	357 096 120	379 182 340	6.18 %
Otros	4 459 080 213	4 146 981 862	4 257 937 031	2.68 %

Fuente: Gussoni (2015, en IGME, 2016)

La demanda de rocas ornamentales en Europa está muy relacionada con la construcción, el mantenimiento y renovación de edificios, y con las obras públicas.

Aproximadamente el 35 % de la producción mundial de roca ornamental es europea, de la cual más del 80 % procede de Italia, España, Portugal y Grecia. El sector se enfrenta a la creciente competencia de países como China, India y Brasil (IGME, 2016).

2.6. Perspectivas

Los indicadores económicos muestran una reactivación en los principales mercados de rocas ornamentales, o por lo menos una reducción de la contracción de la actividad económica, lo que se traduce en buenas perspectivas para el mercado de rocas ornamentales.

Durante la década de los noventa la industria de la piedra natural experimentó una evolución muy favorable, hasta el punto de alcanzar una posición de privilegio, caracterizada por la innovación en materiales ofrecidos al mercado, la tecnificación en procesos tecnológicos para mejorar los procesos de corte y acabados y los avances en los modelos de comercialización.

Ahora bien, cabe destacar la incursión de nuevos países como productores de rocas ornamentales. Egipto, Turquía, Irán, Pakistán y Argentina han dado pasos notables en la investigación geocientífica de este tipo de recursos, lo que les ha permitido determinar los yacimientos de materiales pétreos aprovechables en la producción de rocas ornamentales, así como elaborar catálogos técnicos de materiales con variedades cromáticas y texturales que han sido apetecidos en los grandes mercados, y el desarrollo de importantes laboratorios especializados, donde se hacen ensayos de caracterización que permiten certificar la calidad de los materiales comercializados. La industria sigue dependiendo del papel protagónico de los grandes países productores, los cuales tienen la tecnología apropiada para la transformación de los materiales en bruto.

Otros países aparecen como productores de materiales en bruto, algunos caracterizados por desarrollar procesos de extracción y beneficio sin el cumplimiento de normas de protección ambiental. En este grupo están China e India, los mayores productores, pero realizan los procesos industriales sin las suficientes normas de protección paisajística, medioambiental y de recursos. Estas naciones, al igual que los nuevos productores, necesitan adoptar las últimas tecnologías para los procesos de extracción, corte, caracterización y comercialización en un marco de protección del medio ambiente y de las rigurosas normas internacionales vigentes para el comercio de esta clase de productos.

3. Rocas ornamentales en Colombia

El desarrollo de la industria de rocas ornamentales en Colombia es muy incipiente debido a que ha estado a cargo del sector privado, que ha desarrollado sus propios trabajos de búsqueda de materiales para comercialización. El Estado considera crucial la investigación geológica conducente a la identificación de yacimientos de rocas ornamentales. En el año 2004, Ingeominas (hoy SGC) desarrolló el proyecto "Materiales lapidarios en la Sierra Nevada de Santa Marta", que permitió la identificación de nuevas litologías de interés para comercialización en mercados nacionales e internacionales (Ingeominas- Minercol, 2004). Es necesario llevar a cabo nuevos proyectos de exploración regional y detallada que permitan vislumbrar las posibilidades de desarrollo de este segmento económico. El SGC, en desarrollo del Programa Nacional de Exploración de Minerales Industriales, considera la inclusión de las rocas ornamentales como objeto de investigación.

3.1. Geología regional

En la evolución de las tres cordilleras colombianas sucedieron eventos tectónicos que deformaron y fracturaron rocas desde el Precámbrico hasta las más recientes, lo cual afecta las posibilidades de extracción de grandes bloques, en función de su fracturación. Esto limita el desarrollo de la industria de rocas ornamentales a gran escala. De ahí la importancia de realizar estudios detallados que permitan identificar los sectores más apropiados. Una característica positiva de la minería de rocas ornamentales es la posibilidad de extraer grandes volúmenes de roca en áreas relativamente pequeñas.

En el oriente colombiano, las regiones de la Orinoquia y la Amazonia, correspondientes al cratón de las Guayanas, constituyen zonas de gran potencial para la explotación de rocas ornamentales por la variedad de rocas allí existentes y sus colores, así como por las condiciones estructurales y tectónicas estables. Pero es necesario crear la infraestructura vial que permita el desarrollo de los procesos productivos y posibilite el transporte de materiales hacia los mercados internos y los puertos de exportación.

3.2. Geología local

Las rocas ornamentales se explotan relativamente poco en Colombia, y se trabajan a partir de una pequeña variedad de rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas; no obstante, de acuerdo con la petrografía y génesis explicadas en los numerales precedentes, su potencialidad es bastante alta, y se expresa en este trabajo en función de la ocurrencia de afloramiento de las diversas clases de rocas, cartografiadas en los mapas geológicos del país. En el territorio nacional hay, además de "mármoles", una gran variedad de rocas como granitos, cuarzomonzonitas, cuarzodioritas, dacitas, andesitas y neises que pueden emplearse en esta industria; sin embargo, la explotación y el aprovechamiento de estas rocas no han tenido el suficiente crecimiento. Son pocos los depósitos que se explotan para la obtención de piezas de gran tamaño, y las técnicas utilizadas son, por lo general, muy rudimentarias. El actual dinamismo y crecimiento de la industria de la construcción debería constituirse en un estímulo que impulse el desarrollo de la industria de rocas ornamentales, así como la producción nacional con proyección al comercio internacional.

Como se anotó anteriormente, en Colombia se han originado diversos tipos de rocas a lo largo de su historia geológica, razón por la cual en los estudios regionales se mencionan aquellos lugares geográficos más conocidos, donde se ha reportado la presencia de rocas potencialmente aplicables a la industria de rocas ornamentales.

3.2.1. Región atlántica

La región atlántica está conformada por ocho departamentos, a saber: Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, San Andrés y Providencia, y Sucre. En esta región, la explotación de carbón y gas natural es la actividad minera que ha tenido mayor dinamismo; no obstante, la construcción en ciudades como Montería, Santa Marta, Barranquilla, Cartagena y Valledupar ha mostrado gran crecimiento, lo que hace de estos lugares mercados promisorios para materiales pétreos.

El Gobierno nacional, por intermedio de Ingeominas, adelantó una exploración básica entre los departamentos del Cesar y La Guajira. En cumplimiento de las actividades de campo se determinaron cuatro sectores de interés, denominados, de sur a norte, Bosconia-Copey, María Angola-Valledupar, Patillal-Badillo y Atánquez-Cuestecita, donde son evidentes los eventos magmáticos, plutónicos, hipoabisales, efusivos y explosivos, la presencia de rocas sedimentarias detríticas y no detríticas, y los depósitos aluviales recientes. El batolito de Patillal se consideró una estructura de interés para la explotación de rocas ornamentales. El batolito está constituido por una roca granítica a cuarzomonzonítica hornbléndica y biotítica de color rosado, textura fanerítica, holocristalina de gruesa a muy gruesa, donde se ubica un área como blanco de exploración denominado Caracolí, en el que además se definieron reservas inferidas para tres sectores (Patillal, Socola y Palomas), del orden de los 112 millones de m^3 (Bernal, 2004).

En la región atlántica, el mayor consumidor de piedras de ornamentación es Valledupar, donde en la actualidad hay registradas diez minas de pétreos, mármol, conglomerado, grava y gravilla. En Manaure se encuentran ocho minas ilegales de extracción de materiales pétreos.

Existen algunas compañías importantes productoras de materiales pétreos, como Colombiana de Mármoles, en la localidad de Toluviejo (Sucre). Esta empresa produce y comercializa tabletas y retales de mármol y cal. En las localidades de Albornoz y Turbaco (Bolívar) se encuentran calizas arrecifales de edad Neógena, dispuestas en capas lenticulares subhorizontales que son utilizadas como piedra de revestimiento, y sobre las cuales se han desarrollado minas que están en plena actividad (figura 15).



Figura 15. Cantera de mármol Mina Nueva, en Turbaco, Bolívar (Coralene S. A.)

Fuente: Cárdenas, Pulido y Valderrama (2001)

En cercanías de Valledupar, en la vía que conduce a Bosconia y La Paz, se localizan varias explotaciones de calizas lumaquélicas de color café con incrustaciones de fósiles marinos (conchas de gastrópodos, bivalvos y otros). Dichas explotaciones se dedican principalmente a la obtención de bloques para aserrío. También se encuentran varios yacimientos de mármoles y travertinos de tonos pardos, parcialmente explotadas, de los cuales el más reconocido el denominado travertino Bosconia (mármoles venecianos) (Cárdenas, Pulido y Valderrama, 2001).

En el departamento del Magdalena se encuentra un depósito de mármol asociado a los esquistos de La Gaira, localizado 6 km al sur de la ciudad de Ciénaga, conocido comercialmente con el nombre de *mármol de Ciénaga*. Se presentan dos niveles de mármol de color blanco a gris, con tamaño de grano variable y textura gruesa. El nivel inferior es relativamente puro y bajo en magnesio, y el superior está constituido por cuarzo y dolomita.

3.2.2. Región andina

La región andina está integrada por los departamentos de Antioquia, Santander, Norte de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Quindío, Tolima, Huila, Cauca y Nariño. Todos estos departamentos están comunicados por carreteras principales, pavimentadas, de las cuales se desprenden vías secundarias y terciarias que permiten la comunicación con los diferentes municipios, corregimientos y veredas.

En la localidad de Puerto Triunfo, jurisdicción del corregimiento de Doradal (Antioquia), se ubica un gran depósito de calizas cristalinas y mármoles de edad Paleozoica, explotados por la Compañía de Cementos Río Claro. El material extraído se utiliza para la producción de cemento y para la extracción de material ornamental. En el caserío de La Danta, distante 12 kilómetros de la planta de cemento, existen varias explotaciones de tipo artesanal que producen rajón y bloques de menores dimensiones, usados en el mercado de lápidas (Cárdenas *et al.*, 2001). Por otra parte, en los municipios de Valdivia y Yarumal (Antioquia) se explota la piedra Valdivia. El yacimiento consta de filitas y esquistos verdes incluidos en el grupo Valdivia, de edad Paleozoica (Rodríguez, 2002).

En el departamento de Santander, en los sectores de La Mesa de Los Santos y del municipio de Curití, afloran calizas del Cretáceo. En el municipio de Tona igualmente surgen mármoles, cerca del páramo de Berlín; en la carretera que media entre las localidades de Berlín y Vetas, sobre el río Mataperros, a unos 50 km al noreste de Bucaramanga, aflora la formación Silgará, donde se presentan diez capas de mármol con espesores de entre 0.75 y 5.25 m. En el municipio de Mutiscua se explota mármol que se utiliza para la obtención de productos artesanales. En la figura 16 se muestra la cantera de La Mesa de los Santos y el estado de desarrollo.



Figura 16. Explotación de caliza en La Mesa de los Santos

Fuente: Cárdenas *et al.* (2001)

En el departamento también se extraen areniscas que pertenecen a diferentes unidades del Cretáceo. Un ejemplo es la arenisca asociada a la formación Areniscas de Chiquinquirá, que aflora en inmediaciones de la localidad de Barichara, y se explota para su uso en enchapes de iglesias y viviendas de Bucaramanga. Rocas metamórficas, especialmente esquistos, se explotan en los municipios de Aratoca y Santa Bárbara. La formación Silgará es una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada, compuesta por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea (Ward *et al.*, 1973), que aflora principalmente al noreste de Bucaramanga, desde Matanza hasta Cachirí, al oeste de la falla Bucaramanga-Santa Marta, desde Piedecuesta hasta Aratoca, y al suroeste de San Joaquín hasta El Encino. En el municipio de Cepitá (Santander) se labran algunos bloques de granitos y mármoles relacionados con la formación Granito de Pescadero. El material explotado proviene de colu-

viones cuya fuente es el mismo Granito de Pescadero, donde se aprovechan pequeños bloques con dimensiones de entre 40 y 50 cm, utilizados como retal (Cárdenas *et al.*, 2001).

En el departamento de Boyacá, 1.5 km al sur de la localidad de Villa de Leyva, se explotan capas de travertino, conocido con el nombre comercial de *travertino Villa de Leyva*. Las capas aprovechables alcanzan los 34 m de espesor, en un área de cuatro hectáreas. La edad de este depósito es Hauteriviano Superior.

En el departamento de Cundinamarca, la roca ornamental más importante es la conocida como *piedra bogotana* o *piedra muñeca* (figura 16), que se extrae de la formación Arenisca Dura del grupo Guadalupe, la cual aflora en la sabana de Bogotá y se extiende hacia el departamento de Boyacá, al norte. Estas rocas ornamentales se emplean muy a menudo en fachadas y como elemento estructural; su color generalmente es pardo claro a blanco, de buena aptitud para el trabajo de talla. En Cundinamarca, los municipios productores más importantes son Bogotá, Soacha, Tocancipá, Guachetá y Sibaté.

En el departamento de Caldas se explotan algunas pizarras, aunque no se tienen mayores datos. En el Tolima se extraen mármoles asociados a la formación Payandé, de edad Triásico-Jurásica, principalmente en jurisdicción de los municipios de Rovira, San Luis y Valle de San Juan. El depósito está constituido por calizas intruidas por diques dioríticos y andesíticos que metamorfizaron parcialmente las calizas y terminaron transformadas en mármoles de color blanco a rosado, según Londoño y Ceballos (1969, en Cárdenas *et al.*, 2001).



Figura 17. Explotación de piedra bogotana en Sibaté (Cundinamarca)

Fuente: Cárdenas *et al.* (2001)

En este departamento también se explotan rocas metamórficas, más exactamente un depósito de serpentina ubicado en el municipio de Ibagué, en la vereda La María. La serpentina deriva de la alteración de un cuerpo ultramáfico emplazado tectónicamente entre esquistos verdes cloríticos-actinolíticos pertenecientes al grupo Cajamarca, de edad Paleozoico. El depósito está relacionado con una zona de falla, y presenta alteraciones a talco. El cuerpo es masivo en el centro y fracturado en los bordes, según el Inventario Minero Nacional (1995, en Cárdenas *et al.*, 2001).

Algunos esquistos cloríticos asociados con el grupo Cajamarca que afloran en la vía Ibagué-Pastales se explotan y emplean en enchape rústico de viviendas. Por otra parte, rocas ígneas de composición granítica y granodiorítica permiten extraer el denominado *granito gris de Mariquita*, que en el sitio de mina tiene una dimensión que oscila entre 10 y 16 m de frente y 27 m de alto por 35 a 70 m de largo. Se trata de un coluvión de piedemonte desprendido del *stock* de Mariquita, de edad Cretácea (Ingeominas, 1996).

En el departamento del Huila hay actividad de extracción de mármoles de colores rosado mandarina, rosado claro, azul, blanco, verde y gris que se explotan en los municipios de Neiva, Santa María y Palermo, asociados a rocas precámbricas intruidas por diques granodioríticos, y que algunos autores agrupan en el complejo Aleluya.

En la región del departamento del Cauca, específicamente en los municipios de Silvia, Jambaló, Toribío, Corinto y Miranda, hay mármoles asociados al complejo Arquía; los mármoles se encuentran dentro de una franja de más o menos 250 m de ancho, intercalada con esquistos cuarzo-sericíticos, en dirección norte-sur y constituida por dos niveles de 10 m de potencia separados por esquistos calcáreos de espesor variable. También se encuentran calizas en Corinto y Pitayo, según Rosas (1992, en Cárdenas *et al.*, 2001).

Las canteras más conocidas del departamento se localizan en los municipios de Corinto, Miranda, Toribío y Silvia, en el noreste del departamento, y se denominan Yarumal, Guengue Bajo, La Calera, La Cristalina, Eucaliptos, Guengue Alto, Tacueyó y Pitayó.

Además, en el Cauca se aprovechan las acumulaciones de tobas volcánicas (ignimbritas) que se formaron en la cadena de los Coconucos, al igual que aquellas que se encuentran en las Lajas y Río Hondo, ubicado a unos 5 km de Popayán. También en la vía de Popayán-Jambaló afloran rocas graníticas del Jurásico, de color blanco, potencialmente aptas para ser usadas como materiales lapidarios (Cárdenas *et al.*, 2001).

En el departamento del Valle se explotan algunas filitas, de las cuales las más conocidas son las del municipio de Dagua, asociadas al cinturón de rocas metasedimentarias de la formación Cisneros, en un punto conocido como El Naranjo, a 2 km de la localidad de Loboguerrero (figura

17). La parte explotada de la formación está constituida litológicamente por filitas y pizarras grises claras y verdes. Un afloramiento de la formación Espinal, en la vereda El Queremal, también se ha explotado para obtener piedras de enchape, sobre todo cerca de las fallas principales, donde las sedimentitas de grano más fino de esta formación pueden desarrollar foliación.

En el departamento de Nariño, la principal fuente de materiales para ornamentación la constituyen los depósitos volcánicos, que van desde el Terciario hasta el Reciente, y que están distribuidos ampliamente como material de relleno en extensas depresiones y antiguos valles y terrazas. En los municipios de Ipiales, Pasto, Cumbal y Potosí se extrae rajón para ornamentación, proveniente de las secuencias de lavas interestratificadas con flujos piroclásticos, cenizas, aglomerados y otros depósitos originados por actividad volcánica, así como en los flujos de escombros, lahares y terrazas recientes (Ingeominas, 1995).

Existen otros departamentos que presentan extracciones de materiales ornamentales, como La Guajira (en Barrancas), Norte de Santander (Pamplona), Caldas (La Victoria) y Quindío (Génova), que no son lo suficientemente conocidos, si bien algunos están representados en el mapa de depósitos de rocas ornamentales en Colombia (figura 19).



Figura 18. Extracción de filitas en el municipio de Santa Rosa de Osos- Antioquia

Fuente: Becerra (2009)

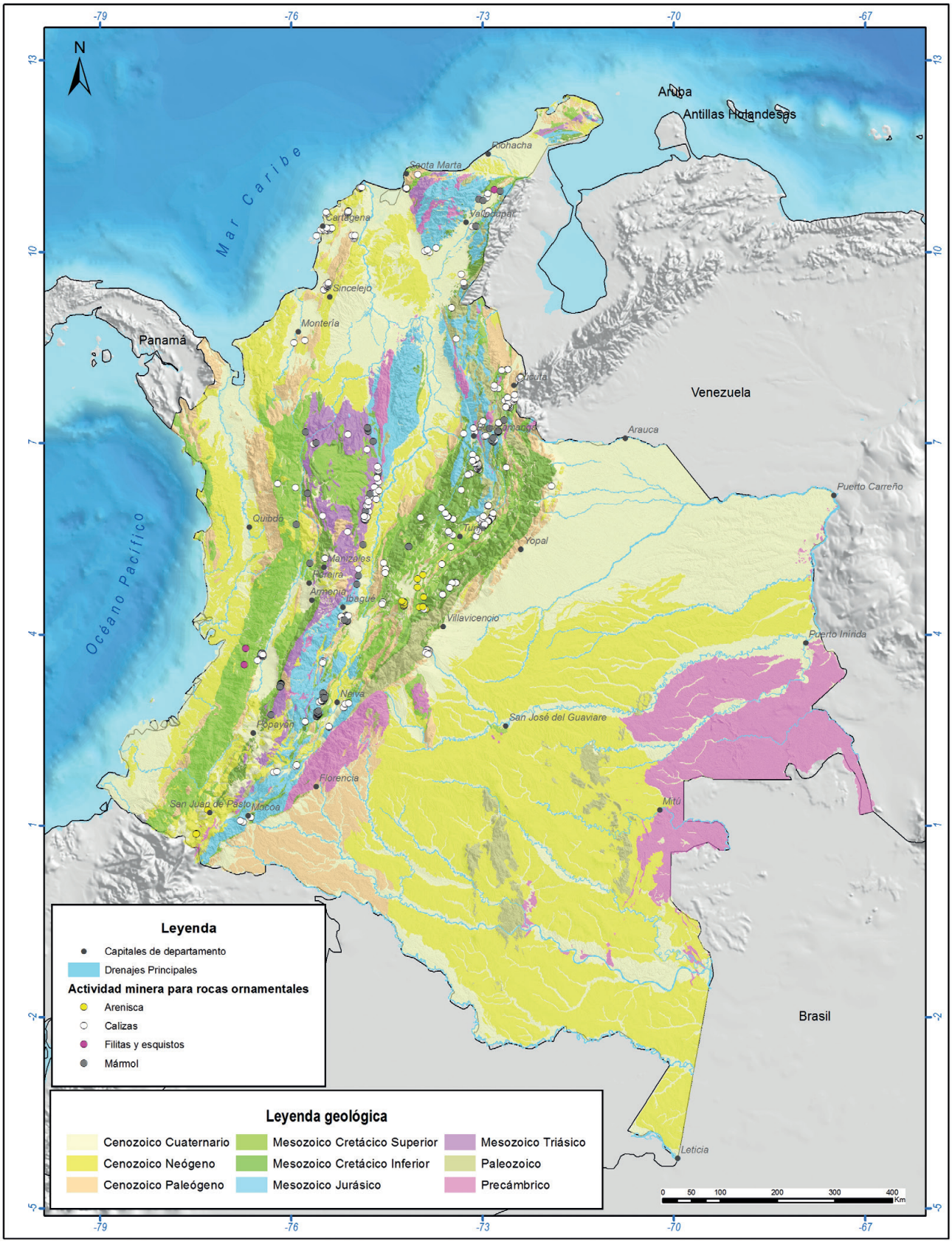


Figura 19. Actividad minera relacionada con rocas ornamentales en Colombia

Fuente: ingeominas (1994-2002)

Como puede verse, las rocas ornamentales se explotan poco en Colombia, y se aprovecha una pequeña variedad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. No obstante, el país tiene un gran potencial de rocas ornamentales debido a la complejidad de eventos geológicos que caracterizan la geología colombiana. Los macizos de Santander y Floresta, los batolitos de la cordillera Central, las rocas precámbricas del Escudo Guayanés, además de las formaciones sedimentarias Paleo, Meso y Cenozoicas, ofrecen un gran potencial que debe explotarse. Los resultados del proyecto Exploración de Materiales Lapidarios en la Sierra Nevada de Santa Marta muestran que en el departamento del Cesar se encuentran rocas metamórficas e ígneas con características apropiadas para continuar con el proceso de investigación geológica detallada y con su caracterización. Se identificaron características fundamentales, como el color, calidad del brillo y sus características geomecánicas (tabla 6), que las hacen aptas para el desarrollo de un polo extractivo en esta región.

Tabla 6. Caracterización tecnológica de granitos ornamentales de la Sierra Nevada de Santa Marta, departamento del Cesar

Caracterización tecnológica						
Tamaño del grano	**Fino**	**Fino**	**Fino**	**Fino**	**Fino**	**Fino**
Porosidad abierta	1.00 %	1.70 %	1.00 %	1.00 %	2.60 %	1.30 %
Densidad aparente (kg/m^3)	2600	2570	2790	2600	2520	2680
Resistencia al desgaste por rozamiento (mm)	3.3	2.96	1.9	3.3	3.05	1.72
Resistencia a la compresión (Mpa)	154	164	203	154	190	196
Resistencia a la flexión (Mpa)	18 275	26 372	15 466	18 275	29 868	31 300
M. dureza Knoop (Mpa)	2478	1470	1587	2478	1965	1543
Resistencia al choque (cm)	37.5	52.5	40	37.5	45	49
Absorción de agua por capilaridad (g/m^2.S½)	0.537	0.586	0.262	0.537	1.376	0.531
Resistencia a las heladas (pérdida de masa)	0.056	0.044	0	0.056	0.32	0
Resistencia a la cristalización de sales	0.15	0.1	0.09	0.15	0.05	0.37
Absorción agua a presión atmosférica	0.2	0.4	0.2	0.2	0.7	0.3

Fuente: Bernal (2004)

Es imperativo el desarrollo de proyectos de exploración geológica específica para localizar nuevos tipos de rocas que puedan aprovecharse como rocas ornamentales. Además de la identificación de litologías, se requiere hacer ensayos de caracterización tecnológica que permitan conocer las características intrínsecas de la roca, condicionantes de su uso y determinar el comportamiento de los materiales investigados en diversas condiciones medioambientales y en sus diferentes demandas. Así se tendrá un conocimiento pleno del material lapídeo y podrán ofrecerse productos competitivos con altos estándares de calidad, como lo exige el mercado de rocas ornamentales. El dinamismo de la industria de la construcción estimula el desarrollo de la industria de rocas ornamentales, con la meta de ofrecer nuevos productos a los mercados nacionales y de que el país incursione en los mercados internacionales.

3.3. Situación actual de la minería

El desarrollo de las rocas ornamentales en Colombia es muy incipiente, poco especializado y se limita a producir piezas de pequeñas dimensiones que se comercializan en mercados locales de la industria de la construcción. Los productos provenientes de las actividades mineras obtenidos mediante el laboreo mecánico o manual son comercializados en Colombia con unos nombres informales, como puede observarse en la tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones de algunas rocas ornamentales de Colombia

Nombre	Forma	Dimensiones (cm)
Piedra songa	Bloque	60 x 30 x 30
Piedra media songa	Bloque	30 x 30 x 30
Piedra de primera	Bloque	20 x 20 x 20
Retal y de tercera	Bloque	20 x 10
Retal de segunda	Bloque	10 x 5

Fuente: Rodríguez (2002)

Se consideran también fragmentos de tamaños menores, como grava, gravilla o arena. Todos ellos pueden

usarse como piedras ornamentales o agregados ornamentales (Rodríguez, 2002).

3.3.1. Potencial

Las oportunidades que tiene el país en el sector de las rocas ornamentales son grandes, si se consideran el potencial geológico-minero y la diversidad de ambientes geológicos, que facilitan la producción de distintas clases de roca, que, debidamente explotadas y beneficiadas, pueden tener gran aceptación en los mercados nacionales e internacionales. Todas las provincias litosféricas en las cuales se ha dividido el territorio colombiano son potencialmente productoras de variedades de rocas ornamentales similares a algunas que se importan hoy en día y de otros tipos de materiales considerados exóticos, con los cuales Colombia podría abrir interesantes mercados en los ámbitos nacional e internacional. De ahí la necesidad de llevar a cabo proyectos de exploración geológica que permitan localizar nuevos tipos de rocas que podrían aprovecharse como rocas ornamentales. Para desarrollar la industria de rocas ornamentales como un segmento de interés de la economía nacional, debe conjugarse el trabajo de exploración con el desarrollo de laboratorios especializados en caracterización tecnológica de rocas, de tal manera que se ofrezcan al mercado productos lapídeos con altos estándares de calidad, tal como lo hacen los actuales países productores; de este modo Colombia podría posicionarse como productor de rocas ornamentales.

3.3.2. Comercio

El mercado colombiano de rocas ornamentales estuvo dominado hasta hace unas cuatro décadas por productos de origen y tradición local. En el centro del país, grupos de expertos artesanos han cultivado el arte del corte, tallado y pulido de la arenisca llamada *piedra bogotana*. De igual manera, en otras regiones del país se han utilizado bloques y enchapes obtenidos de algunas rocas volcánicas, piedras coralinas y lajas de rocas pizarrosas. Por sus altos costos, el mármol importado solo se empleaba en edificaciones de lujo y en templos religiosos.

En la década de los sesenta, como fruto de la iniciativa del italiano Giorgio Badalacchi, empezaron a operar en el país los primeros telares que permitieron la producción industrial de tabletas de enchape. Por esa misma época comenzó la explotación de bloques en la mina de travertino de Villa de Leyva, utilizando el sistema de corte con hilo metálico, sistema que en los años siguientes se introdujo también en las minas de Curití para extraer el llamado *mármol negro San Gil*. Por la misma época comenzaron a producirse industrialmente plaquetas de algunas variedades de piedra bogotana.

En los años setenta, aprovechando las facilidades arancelarias del Pacto Andino, llegaron al país grandes importaciones de tabletas de travertino peruano. El moderado costo de estos productos impulsó el uso de las piedras ornamentales en el enchapado de pisos y fachadas. Luego, a principios de la década de los noventa, a tono con las tendencias arquitectónicas internacionales, y al ritmo del auge importador que trajo la apertura económica, se popularizó definitivamente el empleo de las piedras ornamentales. La nueva demanda incrementó la importación de piedras en bruto, pero al mismo tiempo propició el desarrollo de la minería y la actividad lapidaria. En estos años se inició la producción en el país del mármol verde Andes, del granito perla y de otras vistosas variedades de enchapes.

En este momento, en el mercado colombiano hay disponibles quince variedades de rocas ornamentales de origen nacional. Entre ellas se destacan el travertino Villa de Leyva, los mármoles negro San Gil, gris Payandé, café pinta, negro caracol y gris Río Claro, los granitos gris perla, jaspe y beige rosa, las areniscas crema y blanca Sibaté y las rocas coralinas Sahara y compacta. Con estas variedades, el mercado colombiano compite con productos importados de Italia, Venezuela, Perú, Sudáfrica, Brasil y Guatemala, entre otros países.

Entre las rocas importadas de alta demanda local se destacan el travertino del Perú; los mármoles blanco Carrara, verde quetzal y verde antiguo, los granitos marrón veneciano, rojo Guayana, café báltico, negro absoluto, labrador gris, labrador azul y verde ubatuba. Estos materiales son importados de Italia, Guatemala, Perú, Venezuela, India, Noruega, Finlandia, Brasil y Sudáfrica, entre otros lugares, ya que debido a las tendencias arquitectónicas son muy apreciados.

Cabe señalar que el crecimiento de esta industria se ha centrado en el sector privado, y solo en los últimos años el Estado colombiano ha considerado prudente, en el marco del Plan Nacional de Desarrollo Minero, impulsar el conocimiento de este recurso en cuanto a blancos de exploración, con el objetivo de incentivar la inversión nacional y extranjera, dadas las estadísticas de importaciones y exportaciones y la enorme variedad de tipos de rocas que existen en el territorio nacional.

En la tabla 8 se observa la relación de la producción reportada por el grupo de regalías de la UPME en el periodo 2013-2016. Como ya se mencionó, aún es un mercado muy incipiente en la economía nacional, si bien presenta un potencial muy elevado. En la figura 20 se

registran las exportaciones de rocas ornamentales durante el periodo 2010-2016. Allí puede observarse que hay una notable recuperación en el sector, luego de un descenso drástico ocurrido en el año 2013. Este es otro motivo más para intensificar los procesos exploratorios en este tipo de depósitos.

Tabla 8. Producción de rocas ornamentales en el periodo 2013-2017

Año	Minerales no metálicos de uso industrial	Mineral	Unidad de medida	Cantidad por mineral
2013	Rocas ornamentales	Granito (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	
		Granito (bloque menor a 1 m^3)	m^3	
		Mármol (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	612.04
		Mármol (bloque menor a 1 m^3)	m^3	1 131.86
		Piedra arenisca o piedra bogotana	m^3	7 917.00
		Roca coralina (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	
		Roca coralina (bloque menor o igual a 1 m^3)	m^3	
		Serpentina (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	61.00
		Serpentina (bloque menor a 1 m^3)	m^3	
		Travertino y calizas cristalinas en bloque (bloque menor o igual a 1 m^3)	m^3	125.68
		Travertino y calizas cristalinas en bloque (bloque menor o igual a 1 m^3)	m^3	966.67
		Serpentina en rajón	m^3	
		Mármol en rajón	m^3	37 815.66
2015	Rocas ornamentales	Mármol en rajón (retal de mármol)	t	12 906
		Serpentina en rajón	t	0
		Granito (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	25.22
		Granito (bloque menor a 1 m^3)	m^3	39.52
		Mármol (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	0
		Granito (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Piedra arenisca o piedra bogotana	m^3	1749
		Serpentina (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	0
		Serpentina (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Travertino y calizas cristalinas en bloque mayor a 1 m^3	m^3	0
		Travertino y calizas cristalinas en bloque menor a 1 m^3	m^3	0
2016	Rocas ornamentales	Granito (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	0
		Granito (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Mármol (bloque mayor o igual a 1 m^3) y travertino en bloque	m^3	0
		Mármol (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Piedra arenisca o piedra bogotana	m^3	0
		Roca coralina (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	0
		Roca coralina (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Serpentina (bloque mayor o igual a 1 m^3)	m^3	0
		Serpentina (bloque menor a 1 m^3)	m^3	0
		Travertino y calizas cristalinas en bloque mayor o igual a 1 m^3	m^3	0
		Travertino y calizas cristalinas en bloque menor a 1 m^3	m^3	91
		Mármol en rajón (retal de mármol)	t	7979.01
		Serpentina en rajón	t	463
		Serpentinita (silicato de magnesio)	t	0

(…/…)

(…/…)

Año	Minerales no metálicos de uso industrial	Mineral	Unidad de medida	Cantidad por mineral
2017	Rocas ornamentales	Granito (bloque mayor o igual a 1 m³)	m³	ND
		Granito (bloque menor a 1 m³)	m³	
		Mármol (bloque mayor o igual a 1 m³) y travertino en bloque	m³	ND
		Mármol (bloque menor a 1 m³)	m³	25 339.15
		Piedra arenisca o piedra bogotana	m³	ND
		Roca coralina (bloque mayor o igual a 1 m³)	m³	257.00
		Roca coralina (bloque menor a 1 m³)	m³	ND
		Serpentina (bloque mayor o igual a 1 m³)	m³	681.29
		Serpentina (bloque menor a 1 m³)	m³	1 511.00
		Travertino y calizas cristalinas en bloque mayor o igual a 1 m³	m³	20.00
		Travertino y calizas cristalinas en bloque menor a 1 m³	m³	74.00
		Serpentina en rajón	t	ND
		Silicato de magnesio	t	

ND. No se tiene información de producción hasta la fecha

Fuente: UPME (2017); ANM (2018)

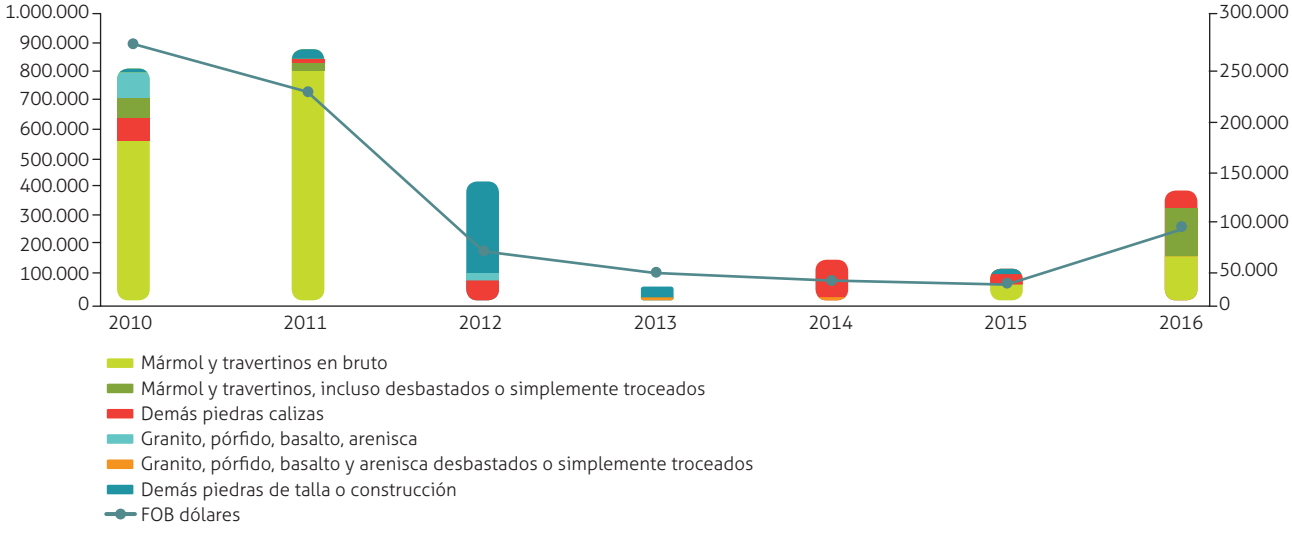


Figura 20. Exportaciones de rocas ornamentales en el periodo 2010-2016

Fuente: UPME (2017)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Desde el punto de vista del medio ambiente, la industria de las rocas ornamentales, al igual que la de las arenas, grava y arcillas, tiene características generales muy similares 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 que se desarrollen nuevos suelos y nueva vegetación.

Bibliografía

Alfaro, A., Gallardo, W., Mantilla, D., Mosqueira, P. y Yopla, M. (2016). Rocas ornamentales. En Filadelfio Cruzado (coord.), *Minería no metálica*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca. Disponible en https://www.slideshare.net/PAOLAMOSQUEIRAVILLAR/capitulo-vii-rocas-hornamentales. Consultado el 5 de marzo de 2018.

ANM (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.

Becerra, J. (2009). Caratterizzazione fisica e chimica e diagnostica del processo di deterioramento delle calcaree della formazione La tampa usate nelle architetture di Medellín (Colombia). En *Formazione Avanzata nel Settore delle Rocce Ornamentali e delle Geoelaborazioni*. Boloña: Asterisco Edizioni.

Becerra, B. y Costa, A. (2008). *Rochas sedimentares com fins ornamentais: os exemplos dos calcários da formação La Tampa (Colômbia) e do arenito Pietra Serena da formação Marnoso-Arenácea (Italia)*. III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais e IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Rio de Janeiro.

Becerra, J. (2009). *Avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários ornamentais da formação La Tampa usados na construção civil de Medellín-Colômbia* (tesis doctoral). Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Becerra, J., Montaña, J., y Escobar, I. (2011). *Unidades geológicas con potencial para rocas ornamentales den los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Sur de Santander*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Bernal, L. (2004). *Exploración regional de rocas ornamentales entre el municipio de Valledupar y las inspecciones de Patillal y Badillo, departamento del Cesar*. Bogotá: Ingeominas.

Cárdenas, J., Pulido, O. y Valderrama, M. (2001). *Explotaciones de piedras ornamentales en Colombia*. Bogotá: Ingeominas. Disponible en http://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=4632

Chiodi, C. (2010). *Exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento. Variação percentual em peso e valor no periodo janeiro-maio 2010*. Abirochas.

Del Monte, M. (2006). La durabilidad de las piedras instaladas. El geólogo de Emilia- Romagna. *Boletín oficial de información de la orden de geólogos de la región Emilia- Romagna*, VI(23), 7-32.

Frazão, B. (2002). *Tecnologia de rochas na construção civil*. Sao Paulo: Associação Brasileira de Geologia, de Engenharia e Ambiental.

Higueras, P. y Oyarzun, R. (1998). *Minerales y monumentos*. Madrid: Universidad de Castilla-La Mancha.

Hinojosa, J. (2005). *Cuellos volcánicos*. Quito: Ciencia.

IGME (2016). *Panorama minero*. Disponible en http://www.igme.es/PanoramaMinero/panorama_minero_2016.pdf.

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

Ingeominas (1995). *Inventario minero de Nariño*. Bogotá.

Ingeominas (1996). *Inventario minero del Tolima*. Bogotá.

Ingeominas-Minercol. (2004). *Aprovechamiento de materiales lapidarios en la Sierra Nevada de Santa Marta, departamentos del Cesar y la Guajira. Informe final*. Bogotá: Ingeominas.

López, J. (1996). *Manual de rocas ornamentales*. Madrid: Gráficos Arias Montano Mostoles.

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

Rock Classification: sedimentary rocks, igneous rocks, and metamorphic rocks (s. f.). Disponible en https://spark.adobe.com/page/0ryZTl2LaV4jl/.

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

Universidad Nacional de Cajamarca. (2016). *Rocas ornamentales*. Disponible en https://www.slideshare.net/PAOLAMOSQUEIRAVILLAR/capitulo-vii-rocas-hornamentales

Universidad Politécnica de Madrid. (2017). *Explotaciones de roca ornamental: diseño de explotaciones y selección de maquinaria y equipos*. Disponible en http://oa.upm.es/21840/1/071120_L3_roca_ornamental.pdf.

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

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, H. 1973. *Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander*. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-132.

Zapata, E. (2016). *Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia*. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.

2. MINERALES ENERGÉTICOS

Uranio

Noel A. Téllez Irreño / Seiry Soleny Vargas / Adrián Pérez Ávila



129. Uranio



Autunita
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Uranio

Noel A. Téllez Irreño, Seiry Soleny Vargas y Adrián Pérez Ávila

Citación: Téllez, N., Vargas, S. y Pérez, A. (2019). Uranio. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El químico alemán Martín Heinrich Klaproth descubrió el uranio como óxido en 1789 y le dio este nombre en honor al planeta Urano, que se había descubierto en 1781. Más tarde, en 1842, Eugène-Melchior Péligot fue el primero en aislarlo en estado metálico, mediante la reducción, con potasio, del cloruro anhidro de uranio. En 1896, el físico francés Antoine-Henri Becquerel puso de manifiesto sus propiedades radiactivas mediante la producción de una imagen sobre una placa fotográfica que había cubierto con una sustancia absorbente de la luz, utilizando una sal fluorescente de sulfato de potasio y uranio.

Investigaciones posteriores de la radiactividad llevaron a que Mary y Pierre Curie descubrieran el radio en 1898, y a conceptos nuevos sobre la organización interna de la materia (Paone, 1960).

El uranio es el único combustible nuclear utilizado para generar energía. Una tonelada de uranio equivale a 8000 toneladas de petróleo y a 12 000 de carbón. Además, tiene una ventaja notable sobre otros combustibles: no produce anhídrido carbónico y, por tanto, no contribuye al efecto invernadero.

Tres elementos (uranio, torio y potasio, y sus productos de desintegración radiactiva) se encuentran en todos los tipos de rocas. La desintegración radiactiva de estos elementos produce la emisión de una partícula alfa o beta de su núcleo y de energía electromagnética en forma de rayos gamma. Esta energía gamma es la propiedad que se utiliza para la prospección del uranio; casi todos los equipos de prospección se han diseñado con base en dicha propiedad.

1. Usos

El uranio se usa principalmente como combustible en los reactores nucleares. Para producirlo, el uranio natural se separa en dos porciones. La porción combustible tiene más contenido de ^{235}U que la normal, y se denomina *uranio enriquecido*; la porción sobrante, con menor proporción de ^{235}U, se denomina *uranio empobrecido*. El uranio natural, el enriquecido y el empobrecido son químicamente idénticos, pero el uranio empobrecido es menos radiactivo, y el enriquecido es de mayor radiactividad

Además de este uso, el uranio, tanto enriquecido como empobrecido, se utiliza, entre otras, en las siguientes actividades:

- Como protección contra la radiación por el alto peso atómico del U^{238}.
- En estado metálico, para blancos de rayos X y para hacer rayos X de alta energía.
- Como compuestos, en la fabricación de vidrios especiales ($Na_2U_2O_7.6H_2O$) y catálisis (el carburo de uranio se utiliza en la producción de amoniaco).
- Algunos accesorios luminosos utilizan el uranio en fotografía (nitrato de uranio).
- Como trazador, mediante la utilización de isótopos radiactivos, en la investigación de aguas subterráneas.
- En la fabricación de misiles, proyectiles y tanques, entre otros, debido a la alta densidad y punto de fusión.
- En el blindaje de tanques.
- En munición antiblindaje.

2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del uranio, tales como la mineralogía y composición, tipos de depósitos a nivel mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales. Además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio de este mineral a escala mundial.

2.1. Características

A continuación se relacionan las principales características del uranio.

2.1. Geoquímica

El uranio es un elemento químico de número atómico 92 (92 protones en el núcleo). Su peso atómico es 238.07 (es el elemento químico más pesado de origen natural), es más abundante que otros elementos, como el mercurio, la plata y el cadmio. Su concentración media en la corteza terrestre es de 2 ppm y ocupa el puesto 48 en la clasificación de elementos muy abundantes.

Está constituido por tres isótopos naturales: ^{238}U, ^{235}U y ^{234}U. Sus abundancias relativas son 99.2739 ± 0.0007, 0.7204 ± 0.0007 y 0.0057 ± 0.0007 %, respectivamente.

Se piensa que el uranio presenta todos los valores de oxidación entre +2 y +6. No obstante, en minerales solo existen los valores +4, +5, +6; el +4 y el +6 son los más importantes desde el punto de vista geoquímico.

El uranio es un elemento muy extendido; geoquímicamente es muy persistente debido a tres factores (Álvarez, 2005):

1. Su isomorfismo como U^{4+} con el torio, tierras raras y calcio
2. La baja solubilidad del ion U^{4+}
3. La posibilidad de oxidación del U^{4+} al U^{6+} para formar el ion UO_2^+, que se lixivia con facilidad.

En la naturaleza no existe como elemento nativo: aparece en óxidos, hidróxidos y oxisales. Se encuentra en minerales como la pechblenda, la carnotita, la uraninita o el lignito, y forma parte de las rocas, el aire y el agua. El uranio puro contiene más de un 99 % del isótopo ^{238}U, menos de un 1 % del isótopo fisible ^{235}U y cantidades menores de ^{239}U, formado por la desintegración radiactiva de ^{238}U. Entre los isótopos del uranio producidos artificialmente están el ^{237}U y el ^{239}U.

Las principales propiedades del uranio son las siguientes:

- Es un metal radiactivo de color blanco plateado, duro, ligeramente paramagnético, denso, fuertemente electropositivo, reactivo, dúctil y maleable, pero mal conductor de electricidad. Adopta tres formas cristalinas: alfa (688 °C), beta (776 °C) y gamma. La forma beta es maleable y dúctil. Su punto de fusión es 1132 °C, su punto de ebullición, 4134 °C, y su densidad es de 18.95 g/cm³.
- El uranio no se altera por los álcalis, pero desplaza al hidrógeno de los ácidos y de las soluciones de sales de otros metales, como la plata, el cobre, mercurio, platino y oro.
- El uranio reacciona con casi todos los elementos no metálicos. Es soluble en ácido clorhídrico y nítrico, pero muy lentamente en los ácidos no oxidantes (sulfúrico, fosfórico o fluorhídrico). Al combinarlo con el nitrógeno a 1000 se forma un nitruro amarillo. Se combina igualmente con el cloro, el azufre y el carbono para formar, con este último, el carburo de uranio UC_2, que se descompone con el agua para producir H_2 y algunos hidrocarburos.
- El uranio forma sales de uranilo, como el cloruro de uranilo (UO_2Cl_2), que puede descomponerse en presencia de la luz fuerte, y el nitrato de uranio, cuyos cristales tienen la propiedad de ser triboluminiscentes. Los compuestos trivalentes son muy inestables y pasan a ser hexavalentes por exposición continua al aire. El isótopo U^{238} tiene una vida media de unos 4500 millones de años.
- El uranio reacciona reversiblemente con el hidrógeno para formar UH_3 a 250°C; los isótopos de hidrógeno forman deuteriuro de uranio (UD_3) y tritiuro de uranio (UT_3). El sistema uranio-oxígeno es extremadamente complejo. El monóxido de uranio (UO) es una especie gaseosa que no es estable por debajo de 1800 °C. En el intervalo de UO_2 a UO_3 existe gran número de fases. Los halogenuros de uranio constituyen un importante grupo de compuestos. El tetrafluoruro de uranio es un intermediario en la preparación del metal y del hexafluoruro. El hexafluoruro de uranio, el compuesto de uranio más volátil, se emplea en la separación de isótopos de U^{235} y U^{238}. Los halogenuros reaccionan con oxígeno a temperaturas elevadas para formar uranilos y U_3O_8.
- Tanto desde el punto de visa radiológico como químico, el uranio es muy tóxico. En el aire, la concentración máxima permisible de compuestos solubles de uranio es 0.2 mg/m³ desde el punto de vista químico, mientras que en lo que respecta a la radiactividad, la radiación total máxima permisible para el organismo es 0.2 microcuries. En la tabla 1 se indican algunos valores de las propiedades básicas.
- El uranio se encuentra en el suelo en concentraciones de unas pocas partes por millón (ppm). Algunas rocas contienen concentraciones de uranio suficientemente altas para ser explotadas. Generalmente, la roca explotada se lleva a una planta donde se separa el uranio para convertirlo en productos químicos o en metal. Los residuos de esta operación se denominan *relave de molino* y suelen contener grandes cantidades de productos químicos y sustancias radiactivas como el radio y el torio, que no son separados en el proceso.

Tabla 1. Valores de las principales propiedades del uranio

Propiedades	Unidades
Masa atómica	238.0289 uma
Punto de fusión	1405.5 K
Punto de ebullición	4200 K
Densidad	18 950 kg/m^3
Potencial normal de reducción	–1.38 V U^{4}+ | U
Conductividad térmica	27.50 J/m s °C
Conductividad eléctrica	33.3 (mOhm.cm)-1
Calor específico	117.04 J/kg °K
Calor de fusión	12.6 kJ/mol
Calor de vaporización	417.0 kJ/mol
Calor de atomización	490.0 kJ/mol de átomos
Estados de oxidación	+3, +4, +5, +6
Primera energía de ionización	584 kJ/mol
Afinidad electrónica	Sin datos
Radio atómico	1.56 Å
Radio covalente	1.42 Å
Radio iónico	U^{+3} = 1.11 Å
	U^{+4} = 0.93 Å
Volumen atómico	12.59 cm^3/mol
Polarizabilidad	27.4 Å^3
Electronegatividad (Pauling)	1.38

Fuente: Educaplus (2016)

Una de las más destacadas propiedades del uranio es el periodo de desintegración (tiempo de vida media), definido como el tiempo que tarda la mitad del isótopo en emitir radiación y transformarse en otra sustancia. Los periodos de semidesintegración se muestran en la tabla 2, y son muy largos.

Tabla 2. Isótopos del uranio

Nombre del núclido	Vida media	Abundancia %	Masa atómica (u)
Uranio-230	20.8 días	0	230
Uranio-231	4.2 días	0	231
Uranio-232	70 años	0	232.0371
Uranio-233	159 000 años	0	233.0396
Uranio-234	247 000 años	0.01	234.0409
Uranio-235	704 millones de años	0.72	235.0439
Uranio-236	23.4 millones de años	0	236.0456
Uranio-237	6.75 días	0	237
Uranio-238	4470 millones de años	99.27	238.0508
Uranio-239	23.5 minutos	0	239
Uranio-240	14.1 horas	0	240

Fuente: Educaplus (2016)

El ^{235}U tiene la propiedad de ser el único isótopo fisionable. El núcleo del átomo del ^{235}U es capaz de dividirse en dos partes cuando es golpeado por un neutrón. Cuando el átomo se divide, una gran cantidad de energía es liberada y se emiten nuevos neutrones. Este proceso es denominado *fisión nuclear*. Los neutrones emitidos en el proceso de división del núcleo pueden causar la división de otro átomo de ^{235}U; de esta manera se origina una reacción en cadena si la masa del material fisionable excede cierta cantidad mínima, conocida como *masa crítica*. El proceso de fisión es muy importante, ya que es utilizado en el proceso de generación de energía nuclear.

2.1.2. Mineralogía

El uranio no se encuentra en forma pura en la naturaleza, sino combinado con otras sustancias para formar un mineral. En algunos de estos el uranio es el principal componente, mientras que en otros solo forma una pequeña parte.

Los minerales de uranio se pueden dividir en dos clases: primarios y secundarios. La mayoría de los primarios se han formado por soluciones calientes que suben desde las grandes profundidades del interior de la Tierra. Los secundarios se han formado a partir de cambios en los minerales primarios, debidos a la acción de las aguas subterráneas, a intemperismo o a otros procesos naturales.

Entre los minerales primarios más importantes se encuentran los siguientes:

2.1.2.1. Pechblenda

La pechblenda, el más importante de los minerales de uranio, es un óxido de uranio. Es el componente principal en casi todas las menas de ley elevada. Ha sido la fuente de mayor producción en el Congo Belga, Canadá y la República Checa. Se halla en vetas, a menudo asociada a sulfuros de minerales de metales como la plata, el cobalto, níquel, hierro, plomo, zinc, bismuto y cobre. La pechblenda es un óxido mixto de composición entre UO_2 y U_3O_8. En los textos de mineralogía (Berry y Mason, 1959; Hurlbut y Klein, 1984), este mineral se denomina *pechblenda* si su hábito es masivo; pero si su hábito de cristalización es cúbico u octaédrico, se denomina *uraninita*. El mineral es de color negro a negro marrón, tiene una dureza de entre 5 y 6 en la escala de Mohs, peso específico de entre 6.5 y 10, y está siempre parcialmente oxidado (figura 1).



Figura 1. Pechblenda

Fuente: Servivio Geológico Colombiano. Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

2.1.2.2. Uraninita

Este mineral es del mismo color y tiene casi todas las propiedades y las características de la pechblenda. Se presenta en forma de pequeños cristales cúbicos; a veces se encuentra asociada a pechblenda (figura 2).

2.1.2.3. Otros

Los más comunes son los óxidos uraníferos de columbio, tántalo y titanio, como la betafita, euxenitay samarsquita. En general, no se hallan en concentraciones suficientemente grandes como para ser considerados fuentes importantes de uranio. La mayor parte de los colombatos y tantalatos son minerales refractarios, y aunque han sido explotados en menor escala en alguna parte del mundo, por su contenido de uranio, el proceso de beneficio resulta costoso. Estos minerales, que comúnmente se hallan en masas irregulares de cristales bien formados, presentan colores que varían desde rojo pardusco oscuro hasta negro. En astillas delgadas o en polvo, tienen un color decididamente rojizo pardo rojizo, lo cual los distingue de la pechblenda en polvo. Su aspecto es menos parecido al betún que la pechblenda; en su mayor parte se encuentran en pegmatitas.



Figura 2. Gumita con Uraninita
Fuente: Servivio Geológico Colombiano.
Fotografía: Jair Ramírez, SGC

Los minerales secundarios de uranio se caracterizan por su color amarillo, anaranjado y verde brillantes. Se hallan en masas terrosas o en polvo, como grupos de cristales muy pequeños, o como placas aplanadas. Se presentan en casi todos los tipos de rocas y pueden o no hallarse asociados a los minerales primarios. A continuación se exponen los principales minerales secundarios, que sin excepción contienen porcentajes de uranio más bajos que la pechblenda:

- **Carnotita.** Presenta color amarillo brillante a amarillo verduzco. Tiene una dureza de 2, y una densidad de 4.20 g/cm^3. Durante muchos años, este mineral ha tenido importancia comercial en Estados Unidos como fuente de vanadio, radio y uranio. Se ha hallado principalmente en la planicie del Colorado, donde forma masas blandas terrosas, o en polvo.
- **Tiuyamunita.** Este mineral tiene gran relación con la carnotita y se halla asociado a esta; y posee casi sus mismas características y propiedades.
- **Autunita.** Mineral de color amarillo limón brillante, blando. Tiene un hábito tabular y se presenta en cristales aislados o agrupados. Presenta exfoliación perfecta, micácea, dureza de 2 a 2.5, densidad de 3.1 a 3.2. Es fluorescente cuando se lo expone a la luz ultravioleta; toma entonces un color amarillo brillante o verde manzana.
- **Metatorbernita y torbernita.** Tienen un color verde brillante y se presentan en cristales transparentes cuadrados. La exfoliación es perfecta, micácea. No son fluorescentes, su dureza está entre 2 y 2.5, y su densidad es de 3. Estos minerales solo pueden distinguirse entre sí por ensayos de laboratorio.

Existen otros minerales secundarios, pero no son muy comunes; generalmente, se encuentran asociados a los anteriormente expuestos.

2.2. Tipo de depósito

Se describe aquí muy brevemente la presencia del uranio en las diferentes etapas de la diferenciación magmática, que explican la formación de los diferentes depósitos de uranio.

En la clasificación de los depósitos se sigue la descripción de algunos modelos de depósitos presentados en BC Mineral Depósit Profiles (Cox y Singer, 2002).

La concentración media del uranio en la corteza terrestre es 2 ppm, que aumenta a 4 ppm en las rocas graníticas, y disminuye a 0.5 ppm en rocas basálticas. La razón de estas concentraciones estriba en que el uranio, que es un elemento litófilo, se origina en magmas en los que es esencialmente tetravalente. Debido a su gran radio iónico (U^{+4} = 0.93 Å), difícilmente forma minerales independientes al iniciarse la diferenciación magmática, ya que el tamaño grande de los iones no permite que estos entren en la red cristalina de los principales minerales de la roca y solo se acomodan en oclusiones menores o forman películas sobre los minerales, o entran en la red de minerales accesorios.

Al avanzar la diferenciación magmática, los iones de uranio se concentran y forman diferenciados magmáticos tardíos, a partir de lo cual forman sus propios minerales que se depositan en pegmatitas y venas en donde se asocia comúnmente al hierro y, en algunos lugares, al cobre, plomo, zinc, molibdeno y cobalto (Angulo, 1978). El contenido de uranio en las rocas ígneas se explica por el proceso anterior. La tabla 3 muestra dicho contenido en ppm en diferentes rocas.

Tabla 3. Contenido de uranio en rocas ígneas

Tipo de roca	ppm	Rango (ppm)
Dunitas	0.02	0.003-0.05
Eclogitas	0.2	0.013-0.80
Piroxenitas	0.7	—
Gabro	0.9	0.2-3.4
Diorita	2	0.5-11.5
Granito	4	2.2-21
Intrusitos alcalinos	—	0.04-140

Fuente: De Voto (1978)

En la tabla 4 se relacionan las características de los principales depósitos de uranio a nivel mundial.

Tabla 4. Principales depósitos "tipo" de uranio y sus elementos asociados

Tipo de roca y depósito	Roca huésped- edad	Mineralogía - % U_3O_8	Elemento asociado	Forma	Ejemplos relevantes
Conglomerado	Conglomerados, gravas cuarcíticas- Arqueozoico	Uraninita, uranotorita, branerita, Pirita, monazita (0.01-0.2)	Th, Ti, Au, tierras raras, Zr, C, platinoides	Tabular	Witwatersrand (Sudáfrica)
	Proterozoico Temprano a tardío				Jacobina (Brasil)
					Blind River + Elliot Lake (Canadá)
Arenisca	Arenisca fluvial, cuarzosa y arcósica (Paleozoico Superior a Terciario)	Pechblenda, coffinita, carnosita, pirita, marcasita (0.1 a 0.4)	Cu, V, Se, Mo, C,	Tabular, "roll"	Colorado Plateau (EE. UU.)
					Arlit (Nigeria)
Disconformidad	Basamento y metasedimentos (Proterozoico)	Pechblenda, coffinita, pirita, calcopirita, Ni-Co arseniuros, hematita, clorita (0.4 a > 2.0)	NI, Co, Ag, Mo, Cu, Pb, Zn, Bi, Se, As, Au	Filoniano	Athabasca (Canadá), Alligator River (Australia)
Filoniano (Clásico)	Granitos, *gneis*, piroclastos consolidados,	Pechblenda, coffinita, sulfuros y arseniuros, hematita, carbonatos (0.1 a 1.0)	Cu, Co, Ni, Bi, As, Ag,	Filoniano	Jăchimov (R. Checa), Marysvale (EE.UU.), Massif Central (Francia)
	Metasedimentos (Proterozoico a Terciario)		Au, Se, Mo		
Ultrametamórfico	Alaskita, pegmatita, aplita, metasedimentos (Proterozoico)	Uraninita, uranotorita, molibdenita, circón (< 0.1)	Th, Mo, Nb, Ti, tierras raras	Filoniano, diseminado	Rössing (Namibia), Bancroft (Canadá)
Plutones Alcalinos	Plutones y *stocks* alcalinos, carbonatitas (Proterozoico a Cretáceo)	Uraninita, uranotorita, pirocloro, apatita, circón (0.01 a 0.2)	Th, Nb, tierras raras, Zr, Be, Ti, P	Filoniano, diseminado	Ilimaussaq (Groenlandia), Pozos de Caldas (Brasil)
Contacto	*Skarns*-N. D.	Pechblenda, coffinita, pirita, marcasita (0.1-0.2)	Th, tierras raras, B, P	Diseminadoreticulado	Midnite (EE. UU.), Mary Kathleen (Australia)
Vulcanogénico	Complejos hipoabisales, volcánicos y volcanoclásticos (N. D.)	Uraninita, pechblenda, uranotorita, pirita, sulfuros metálicos, fluorita, celestita	Th, Cu, Tierras Raras, Mo, F, Sr	Diseminado filoniano	Rexspar (Canadá), McDermitt (EE. UU.)
Calcreta	Calcreta no pedogénico en drenajes terciarios	Carnotita, yeso	V	Tabular	Yeelirrie (Australia), Langer (Namibia)
		(0.3)			
Fosforita	Fosforita marina y cantos retrabajados	Apatita y carbonatos uraníferos (0.01 a 0.02)	—	Estratificado	Boone Valley (Florida, EE. UU.)
Shales negros	*Shale* marino (Proterozoico)	< (0.01 a 0.02)	V, Cu, Co, Mo, Ni, Zn	Diseminado Estratificado	Chattanooga Shale (EE. UU.)

Fuente: Misra (2000)

Los minerales accesorios de las rocas ígneas, que contienen uranio, pueden resistir los procesos de oxidación, y por resquebrajamiento de la roca se concentran para formar depósitos detríticos de placeres, que pueden constituir depósitos de uranio.

El uranio que en los inicios del proceso de diferenciación magmática forma películas sobre los minerales de las rocas, y que se concentra en pegmatitas y venas en los procesos tardíos de la diferenciación, es fácilmente oxidado y pasa a ser uranio hexavalente, que es soluble en agua. De esta forma es llevado a las aguas superficiales y subterráneas, de donde puede ser absorbido por minerales arcillosos y por materia orgánica, y en parte precipitado químicamente o por evaporación. De esta forma se pueden formar los depósitos de uranio en rocas clásticas (arenisca). Si las aguas con uranio disuelto llegan al mar, puede precipitarse con sedimentos fosfáticos o ser captado por organismos o absorbido por material carbonoso.

Los procesos así esquematizados dan origen a los diferentes tipos de depósitos de uranio, que pueden clasificarse en dos tipos principales:

- Depósitos en rocas sedimentarias
- Depósitos magmáticos

2.2.1. Yacimientos en rocas sedimentarias

Los depósitos en rocas sedimentarias se suelen dividir en depósitos peneconcordantes en areniscas, depósitos en conglomerados de cuarzo, depósitos en rocas fosfáticas y depósitos en *shales* negros marinos. A continuación se

describen algunos modelos de depósitos a partir de la clasificación *BC Mineral Deposit Profiles* (Cox y Singer, 2002).

2.2.1.1. Depósitos en conglomerados cuarzosos (paleoplaceres)

Ambiente de depositación: los conglomerados huéspedes se forman en condiciones de deficiencia de oxígeno en sistemas de canales mayores, generalmente de edad Proterozoico Temprano, en zonas de distensión de la corteza (*rifting*).

- Roca huésped: conglomerados cuarzosos y cuarzoarenitas.
- Edad principal de la roca huésped: Proterozoico Temprano.
- Edad de la mineralización: concentración en placeres, 2250 Ma; modificaciones diagenéticas, 1850 Ma.
- Mineralogía de la mena: placer (uraninita, monadita, zircón autígeno, brannerita, coffinita).
- Elementos asociados: torio, itrio.
- Alteración: concentraciones posplaceres de minerales de bajo grado de metamorfismo, con cuarzo, clorita, moscovita y pirita.
- Probable fuente del uranio: granitos.
- Soluciones mineralizantes: aguas termales que arrastran minerales detríticos productivos de uranio bajo condiciones deficientes de oxígeno.
- Relaciones tectónicas: la roca huésped se desarrolla en cuencas intracratónicas.

2.2.1.2. Depósitos en rocas fosfóricas

Ambiente tectónico-estratigráfico: en plataformas relativamente estables, los depósitos de fosfatos se depositan en cuencas adyacentes a zonas levantadas que causan flujos turbulentos de aguas mezcladas frescas, ricas en nutrientes. Posteriormente el fosfato y el uranio precipitados del agua de mar son removidos, enriquecidos y concentrados.

Roca huésped: peles fosfáticos en dolomitas, arcillas y sedimentos siliclásticos.

Edad de las rocas huéspedes: Mioceno, algunos fosfatos retrabajados en sedimentos del Plioceno y Pleistoceno.

Edad de la mineralización: Mioceno, retrabajados y alterados en el Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. Movilización de fosfatos y uranio hacia la base de las zonas alteradas, lo que ocasiona enriquecimiento al 40 % de P_2O_5 y 0.05 % de U_3O_8.

Mineralogía de la mena: francolita (carbonato fluorapatito), grandalita, milisita, wavelita y livianita en zonas de alteración.

Elemento asociado: fósforo.

Probable origen del uranio: agua de mar.

Soluciones mineralizantes: agua de mar, enriquecimiento supergénico tardío por aguas subterráneas ácidas.

Relaciones tectónicas: llanuras costeras levantadas en el Oligoceno Tardío que continuaron hasta el Plioceno; varias transgresiones y regresiones conexas con la plataforma marginal pasiva, relativamente estable durante el tiempo de depósito.

2.2.2. Yacimientos en rocas ígneas o depósitos magmáticos

A continuación se describen los más importantes, siguiendo la clasificación de *BC Mineral Depósit Profiles* (Cox y Singer, 2002)

2.2.2.1. Venas clásicas de uranio (Mc Millan, 1996)

Sinónimos: venas de pechblenda, venas de uranio, venas intragraníticas, venas perigraníticas.

Productos (biproductos): U (Bi, Co, Ni, As, Ag, Cu, Mo).

Ejemplos: en Columbia Británica (Canadá), en el área de Atlin, en venas de presión de scheelita con control estructural en ocurrencias de Purple Rose, Fisher, Dixie e IRA:

- En Canada/Internacional: Ace Fay-Verna and Gunnar, Beaverlodge area (Saskatchewan, Canadá)
- Christopher Island-Kazan-Angikuni district Baker Lake area (Northwest Territories, Canadá)
- Millet Brook (Nova Scotia, Canadá)
- Schwartzwalder (Colorado, EE. UU.)
- Xiazhuang district (China)
- La Crouzille area, Massif Central and Vendee district, Armorican Massif (Francia)
- Jachymov and Pribram districts (República Checa)
- Shinkolobwe (Shaba province, Zaire)

Descripción: pechblenda (Th-uraninita pobre), brannerita con cantidades menores de minerales metálicos asociados a un carbonato y cuarzo en venas como ganga. Estos depósitos muestran afinidad con los depósitos de "cinco elementos en venas" (Cox y Singer, 2002), que tienen contenidos significativos de plata nativa, arseniuros de Co-Ni, y Bi u otros minerales metálicos.

Ambiente tectónico: ambiente continental posorogénico, generalmente asociado a rocas plutónicas y volcánicas, calcoalcalinas félsicas. Capas rojas (*red beds*) y sedimentos de cuencas de extensión son comunes como rocas de caja. Los depósitos económicos aparecen confinados en áreas subyacidas por rocas de basamento del Proterozoico.

Ambiente de depositación: los minerales se depositan en espacios abiertos en zonas fracturadas, brechas y *stockworks*, comúnmente asociados a sistemas de fallas principales o secundarias de alto ángulo.

Edad de las mineralizaciones: Proterozoico a Terciario.

Roca huésped/tipo de rocas asociadas: una amplia variedad de rocas de caja, incluidos granitos, comúnmente granitos peraluminosos con dos micas y sienitas; rocas volcánicas félsicas, rocas sedimentarias antiguas y rocas metamórficas. Las venas ricas en uranio tienden a tener gran afinidad con las rocas ígneas félsicas. Algunas venas están cerradamente asociadas a diabasas, con diques y silos de lamprófidos.

Formas del depósito: los cuerpos mineralizados pueden ser tabulares o prismáticos, con espesores variables entre centímetros y unos pocos metros (raramente alcanzan 15 m). Muchos depósitos tienen un límite potencial de profundidad de unos pocos cientos de metros; sin embargo, muchos depósitos se extienden desde 0.7 a 2 km de profundidad. En algunos depósitos se pueden encontrar mineralizaciones diseminadas en zonas de alteración.

Textura/estructura: formas como drusas, costras con formas de cintas, texturas coloidales, botroidales y dendríticas son comunes en los depósitos que no han sufrido deformaciones y altas tensiones. Las venas rellenan en general zonas de fracturas secundarias asociadas a fallas mayores y zonas de compresión. En la minas de Ace-Fay-Verna se encuentran asociadas a la falla de San Luis (Canadá), donde son muy comunes las milonitas.

Mineralogía de la mena: principales y subordinados, como principales pechblenda (th-uraninita pobre) y coffinita; como subordinados: urofane, tucolita, brannerita, sulfuros de hierro, plata nativa, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni, seleniuros, telúricos, vanadatos, jordesita, calcopirita, galena, esfalerita, oro nativo y elementos del grupo del platino. Algunos depósitos tienen una mineralogía "simple", con pechblenda y coffinita solamente. Estas venas de mineralogía simple se han interpretado como minerales formados con otros minerales en estados tardíos o tempranos.

Minerales de ganga: carbonatos (calcita, dolomita), cuarzo (a menudo calcedonia) y hematita como principales, y feldespato potásico, albita, moscovita, fluorita y barita como subordinados.

Alteración: cloritización, hematización y feldespatización. Unos pocos depósitos con rocas intrusivas como huéspedes están rodeados por rocas desilicatadas, porosas con feldespato y mica, denominadas *episienitas* en el área de La Crouzille, en Francia, y *roca esponja* en la mina de Gumar, en Sascachewan (Canadá). En la mayoría de los casos, la hematización se debe a la oxidación de minerales ferrosos sometidos a presión en las paredes de las venas durante las etapas de mineralización. La hematina de color ladrillo adyacente a algunos minerales de uranio de alto grado es probablemente debida a la pérdida de electrones durante la desintegración radiactiva del uranio, y es derivada de este proceso.

Meteorización: el uranio, en el estado de valencia +6, es muy soluble por encima del nivel freático. Puede reprecipitarse como uraninita y coffinita, por debajo del nivel freático en el estado de valencia +4, en presencia de agentes reductores, como material húmico o restos carbonosos. Algunos fosfatos, vanadatos, sulfatos, silicatos y arsenatos de uranio son semiestables en condiciones de oxidación; en consecuencia, autunita, torbernita, carnosita, zipeita, urofano, uranospinita y otros minerales secundarios pueden encontrarse en la zona de oxidación, sobre todo en ambientes áridos.

Controles del mineral: en las áreas de sistemas de fallas mayores y zonas de compresión, las zonas de distensión constituyen un importante control de las mineralizaciones.

Una zona de óxido-reducción, debida a la pérdida de electrones, asociada a la alteración de la hematita y precipitación de uranio, es evidentemente un control del mineral, pero no se ha comprendido completamente.

Muchos depósitos están asociados a zonas de discordancias continentales y tienen afinidad con los depósitos de *unconformity-associated U deposit, I16* (Cox y Singer, 2002).

Modelos genéticos: las venas de uranio se encuentran en áreas de depósitos de uranio asociados a alta fracturación. Generalmente, existe otro tipo de depósito de uranio en las vecindades. Las venas pueden ser consideradas poligenéticas. El uranio aparece como derivado de una diferenciación magmática tardía de granitos y rocas alcalinas con altos contenidos de potasio o sodio. El uranio puede ser entonces separado de la roca madre por soluciones acuosas que pueden tener cualquier origen, como aguas hidrotermales de baja temperatura, aguas connotas o meteóricas. Las opiniones, en cuanto al origen de los fluidos, están muy divididas; algunos autores prefieren modelos que incorporan mezclas de fluidos.

Estudios de isótopos de carbono y de oxígeno indican que las soluciones mineralizantes en muchos casos son fluidos hidrotermales que se han mezclado con aguas meteóricas. En algunos casos se han alcanzado temperaturas que exceden los 400 °C durante la mineralización. Los minerales de uranio son precipitados dentro de fallas

a alguna distancia de la fuente de los fluidos. Las paredes de las rocas de caja contienen material carbonáceo, sulfuros y minerales ferromagnesianos que son sitios favorables para la precipitación del mineral. Dataciones radiométricas indican que la mineralización es significativamente más joven que las rocas ígneas félsicas asociadas, y comúnmente asociadas a la edad de los diques de diabasa y de lamprófidos.

Depósitos asociados: yacimientos de uranio en estratos confinados, en diseminaciones y en pegmatitas se encuentran comúnmente en rocas metamórficas antiguas. Depósitos de U en arenas-huéspedes (Cox y Singer, 2002) se encuentran generalmente asociadas con estratos de "capas rojas" subcorticales y depósitos superficiales (Cox y Singer, 2002), en ambientes áridos o semiáridos.

Geoquímica: el uranio, y algunas veces uno o todos de los siguientes elementos, Ni, Co, Cu, Mo, Bi, As, y Ag, son buenos indicadores que pueden utilizarse en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos lacustres y suelos. Muestras de aguas de corrientes y fondos de lagos se pueden analizar para U y Ra. Los gases inertes como He y Rd a menudo pueden ser detectados relacionados con fuentes ricas de uranio en la prospección de suelos, así como en aguas subterráneas y corrientes.

Geofísica: técnicas comunes de prospección usando rayos gamma, escintilómetros y espectrómetros para detectar mineralizaciones *in situ* o en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos son métodos muy efectivos en la prospección. Dado que la mayoría de los depósitos no contiene más que un mínimo porcentaje de minerales metálicos, la prospección con electromagnetismo y polarización inducida no es muy indicada como método de prospección. En la exploración de venas pueden ser utilizados métodos magnéticos para detectar áreas en donde la magnetita ha sido alterada a hematita en las paredes de las rocas de caja.

Otras guías exploratorias: los minerales secundarios de uranio son típicamente amarillos y se utilizan como indicadores de superficie.

Concentraciones y tonelaje: los depósitos individuales son generalmente pequeños (< 100 000 t), con concentraciones de 0.15 a 0.25 % de U. Sin embargo, distritos que presentan varios depósitos pueden agregar considerable tonelaje. El gran sistema Ace-Fay-Verna (Canadá) produce 9 Mt/año de mineral con un porcentaje de 0.21 % de U en numerosos cuerpos mineralizados a lo largo de 4.5 km y a profundidades de 1500 m. Gunnar (Canadá) produce 5 Mt/año de mineral, con porcentajes de 0.15 % de U en un simple cuerpo mineralizado.

Limitaciones económicas: el descubrimiento, a finales de la década de los sesenta, de depósitos de alto grado del tipo discordante hizo que los depósitos de venas con espesores reducidos y concentraciones entre 0.15 y 0.25 % de U resultaran antieconómicos.

Importancia: este tipo de depósito constituyó la principal fuente de uranio hasta 1950. Para 1988, la producción significativa en depósitos de venas se restringió a Francia, con una producción de 3372 toneladas de uranio o el 9.2 % de la producción mundial de ese año.

2.2.2.2. Discordancias asociadas a uranio (Mc Millan, 1996)

Sinónimos: venas discordantes, uranio tipo discordancia, discordancia U.

Producto (biproducto): U (Au, Ni).

Ejemplos:

- En el distrito de uranio de Atabasca (Saskatchewan, Canadá): Rabit Lake, Key Lake, Cluj Lake, Midwest Lake, McArthurRiver, Cigar Lake y Maurice Bay.
- En el distrito de Thelon Basin (territorios del noroeste, Canadá): Lone Gull (Kiggavik) y Boomerang Lake.
- En el distrito de Alligator River (territorio norteño de Australia): Jabiluka, Pager, Koongarra y Nabarlek.

Descripción: los minerales de uranio, generalmente pechblenda y coffinita, aparecen rellenando fracturas y brechas, y diseminados en zonas de formas elongadas, prismáticas o tabulares, alojadas en rocas sedimentarias o metasedimentarias asociadas a una gran discordancia continental.

Ambiente tectónico: cuencas sedimentarias intracratónicas.

Localización geológica/ambiente de depósito: estructuralmente, zonas propicias y porosas con condiciones químicas de reducción favorables o cualquier otro estrato reactivo.

Edad de la mineralización: Proterozoico Medio; sin embargo, hay posibilidad de depósitos más jóvenes.

Huésped/tipo de roca asociada: rocas de facies metasedimentarias (anfibolita o granulita) de edad Paleozoico Temprano (rocas grafíticas o metapelitas ricas en sulfuros, rocas calcisilicatadas y metasamitas), regolitos y areniscas superpuestas continentales del Proterozoico Medio. Las rocas de caja o huéspedes del Proterozoico Temprano en muchos casos son de metamorfismo retrógrado de facies anfibolitas, localizadas en los flancos de domos néisicos arqueanos. Las areniscas superpuestas continentales son

samitas fluviales bien calibradas, ricas en cuarzo, generalmente con una matriz arcillosa o silícea y de color rojo o rojo pálido. Diques y láminas, comúnmente diabasas y lamprófidos, aparecen en ciertos distritos.

Formas del depósito: los cuerpos mineralizados pueden tener formas tabulares, de lápices o irregulares con longitudes de hasta unos pocos kilómetros. Muchos depósitos tienen un límite potencial en profundidad por debajo de la discordancia, o más o menos 100 metros; sin embargo, los depósitos de Jabiluka y Eagle Point (Australia) son concordantes dentro de las rocas del Proterozoico Inferior y se extienden por varios cientos de metros debajo de la discordancia.

Textura/estructura: la mayoría de los depósitos llenan espacios porosos o vacíos en brechas y venas de *stockworks*. Algunos depósitos de Saskatchewan (Canadá) son excepcionalmente ricos, con áreas masivas de pechblenda/coffinita. Características tales como texturas en drusas, bandas de crustificación, estructuras coloidales, botroidales y texturas detríticas se presentan en varios depósitos.

Mineralogía de la mena: pechblenda (Th-uraninita pobre), coffinita, uranofana, tucolita, brannerita y sulfuros de hierro como minerales principales, y entre los subordinados, oro nativo, arseniuros y sulfoarseniuros de Co-Ni, seleniuros, teleniuros, jodesita (molibdenita amorfa), vanadatos, calcopirita, galena, esfalerita y plata nativa. Algunos depósitos son "simples", pues solo contienen pechblenda y coffinita, mientras que otros son "complejos" y contienen arseniuros de Co-Ni y otros minerales metálicos.

Minerales de ganga: carbonatos (calcita, dolomita, magnesita y siderita), calcedonia, cuarzo, sericita (illita), clorita y dravita (turmalina).

Alteración: cloritización, hematización, caolinización, ilitazación y silificación. En la mayoría de los casos, la hematización se debe a la oxidación de minerales ferrosos de compresión en las paredes de las rocas, causadas por oxidación de los fluidos mineralizados; sin embargo, la hematita de color rojo ladrillo adyacente a algunas menas de alto grado de uranio se debe probablemente a la pérdida de electrones durante la desintegración radiactiva del U y es un producto derivado de este proceso. Un aspecto interesante de la zona de alteración de arcillas es la presencia de minerales seudomorfos de alto grado de metamorfismo, como cordierita y granate en las paredes de las rocas del basamento.

Meteorización: el uranio en el estado de valencia +6 es muy soluble por encima del nivel freático. Puede reprecipitarse como uraninita y coffinita, por debajo del nivel freático en el estado de valencia +4, en presencia de agentes reductores, como material húmico o restos carbonosos. Algunos fosfatos, vanadatos, sulfatos, silicatos y arsenatos de uranio son semiestables en condiciones de oxidación; en consecuencia, autunita, torbernita, carnosita, zipeita, urofano, uranospinita y muchos otros minerales secundarios pueden encontrarse en la zona de oxidación cerca de superficie en ambientes áridos.

Control de la mena: hay un control importante relacionado con la discordancia del Proterozoico Medio y un control relacionado con un horizonte estratigráfico favorable en el Proterozoico Bajo de la roca de caja. Este estrato es generalmente grafítico. Zonas de falla locales y regionales que cortan la discordancia pueden ser características importantes.

Modelo genético: el excepcional grado de riqueza que caracteriza este tipo de depósito apunta hacia un origen complejo y probablemente poligenético.

- Algunas formas de concentración muy tardía de uranio en las rocas del basamento arqueano parecen tener gran importancia.
- Las rocas huéspedes o de caja son generalmente del Proterozoico Inferior y corresponden a rocas metamórficas derivadas de sedimentos de cuencas marginales y de facies cercanas a la playa, que han podido concentrar U por procesos singenéticos y diagenéticos
- A pesar de que el comportamiento del U en condiciones de metamorfismo y ultrametamorfismo se conoce poco, es posible que el uranio haya sido movilizado de los domos néisicos y granitos anatécticos próximos del arqueano y precipitados en pegmatitas en depósitos estrato-confinados, como uraninita soluble no refractaria.
- Un enriquecimiento supergénico en paleoregolitos, que están por debajo de la discordancia, puede haber contribuido también en los procesos de concentración del uranio.
- Las areniscas fluviales ricas en cuarzo superpuestas descritas en las rocas de caja han sufrido pequeñas deformaciones, pero han sido afectadas por fallas normales e inversas que probablemente han reactivado las fallas del basamento. En Saskatchewan (Canadá), estas fallas contienen el mineral en varios depósitos, y en otras parecen haber facilitado el transporte de uranio hacia las arenas superpuestas o de recubrimiento.
- Concentraciones hidrotermales diagenéticas de uranio, por mezcla de fluidos oxidantes de la cuenca y reductores del basamento, parecen dar como resultado excepcionales concentraciones de uranio y níquel. Es

posible que el calor radiogénico desarrollado en depósitos excepcionalmente ricos haya sido el causante de la formación de los fluidos calientes y de la removilización de los metales hacia la parte superior del depósito.

- Diques de diabasa aparecen asociados a fallas cerca de varios depósitos; investigaciones recientes sugieren que estos diques pueden haber proporcionado la energía térmica para removilizar y llevar hacia arriba concentraciones de alto grado de uranio. Datos recientes de los diques de Mackenzie en el distrito de Atabasca (Canadá) apoyan esta interpretación.

Tipos de depósitos asociados: depósitos tipo areniscas-huéspedes de U (*Sandstone-hosted U deposit*) (Cox y Singer, 2002) se han encontrado en asociación con arenitas supracorticales ricas en cuarzo. Depósitos diseminados estratoconfinados o *skarn*, como los de Dudderidge Lake y Burbidge Lake (Saskatchewan), y en pegmatitas se presentan comúnmente en las rocas metamórficas del basamento. En ambientes áridos o semiáridos, los depósitos superficiales pueden estar presentes en estratos superiores o de sobrecarga. Los depósitos tienen afinidad con los depósitos clásicos de venas de U de (Cox y Singer, 2002).

Geoquímica: uranio, niquel, coalto, arsénico, plomo y cobre U, Ni, Co, As, Pb y Cu son buenos elementos trazas que pueden ser utilizados en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos de fondo en lagos y suelos. Muestras de aguas de corrientes y de lagos se pueden analizar para uranio y radio. En gases inertes de helio y radio pueden ser detectados sobre fuentes ricas en urnio en exploración de suelos y gases en el suelo, como también en aguas subterráneas y corrientes. En Saskatchewan se han probado técnicas litogeoquímicas en las cuarzo-arenitas del grupo Athabasca por varios cientos de metros directamente sobre el depósito, y en depósitos de cantos glaciares dispersos, localizados bajo el hielo. La técnica incluye boro (dravita) y anomalías bajas de uranio, así como de potasio y magnesio en minerales arcillosos de alteración (illita y clorita).

Geofísica: durante las primeras fases de exploración de la cuenca de Atabasca, exploraciones radiométricas aerotransportadas y terrestres detectaron cerca de la superficie depósitos de uranio y su dispersión por glaciares. Actualmente, la prospección magnética de penetración profunda, terrestre y aerotransportada, se ha utilizado para la elaboración de mapas de arcillolitas grafitosas asociadas a la mayoría de los depósitos. El espectro completo de técnicas modernas (gravimetría, magnetismo, magneto-telúrico, electromagnetismo, polarización inducida, resistividad) pueden utilizarse para cartografiar varios aspectos de estructuras, así como rocas huéspedes o de caja y conjuntos de minerales de alteración en la búsqueda de indicios profundos.

Otras guías de exploración: técnicas comunes de prospección usando rayos gamma o escintilómetros para detectar mineralizaciones directamente en las rocas o en sedimentos de corrientes, en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos provenientes de mineralizaciones de uranio, siguen siendo los métodos más efectivos en la prospección.

Concentraciones y tonelaje: los depósitos individuales son generalmente pequeños, pero pueden exceder, en yacimientos de alto grado, varias veces los porcentajes de uranio normales. El tamaño medio para los depósitos de Saskatchewan y Australia es 260 000 t, con concentraciones de 0.42 % de U. Algunos depósitos tienen grados excepcionalmente altos, tales como el de Key Lake Gaertner-Deilmann (2.5 mt y 2.3 % de U), Cigar Lake (900 000 t y 12.2 % de U) y Mc Arthur River (1.4 mt y 12.7 % de U).

Limitaciones económicas: hasta la última parte de la década de los años ochenta, el promedio de concentración en los minerales se elevaba o excedía el 0.25 % de U. Problemas relacionados con la penetración de las rocas arcillosas alteradas de las paredes y presencia de gas radón y otros elementos peligrosos asociados con algunos depósitos de alto grado de uranio de Saskatchewan han hecho excepcionalmente altos los costos de extracción en algunos casos.

2.3. Métodos de prospección

Los trabajos deben realizarse siguiendo estas etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada (UN, 2001).

En la etapa de reconocimiento, las áreas con potencial de mineralización se identifican con base en los resultados de los estudios geológicos regionales, la inspección preliminar de campo y otros trabajos regionales, como, por ejemplo, estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos gamma-espectrométricos.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el depósito que será el posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo geoquímico y trabajos geofísicos por medio de métodos radiométricos y magnéticos, preferentemente.

La exploración general permite la delineación inicial de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreo superficial, trabajos geofísicos complementarios

que pueden incluir métodos radiométricos, magnéticos y geoeléctricos, así como la realización de apiques y algunas perforaciones que permitan delimitar más exactamente el área de interés.

La exploración detallada permite la delineación tridimensional minuciosa de los depósitos mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones.

En general, la prospección del uranio es poco diferente a la de otros minerales, si se exceptúa la utilización de algunos instrumentos especializados en la detección de especies radiactivas. Los siguientes son algunos de los equipos especiales utilizados:

Contador Geiger. Es el instrumento más práctico inventado hasta la fecha para descubrir materiales radiactivos en el campo. Es generalmente llamado *contador de centelleo*. Estos instrumentos registran pulsaciones aun cuando no estén cerca de minerales uraníferos u otros materiales radiactivos. A estas pulsaciones se les designa *cuenta de fondo*. Son producidas por rayos cósmicos y, parcialmente, por pequeñas cantidades de elementos radiactivos presentes en casi todo cuanto existe sobre la Tierra. La cuenta de fondo varía de acuerdo con la sensibilidad del contador, así como con la topografía y geología de la región: es más elevada sobre algunas rocas (como granito) que en otras (como basalto y caliza).

El primer contador portátil, el Geiger-Muller, con un peso de 25 kg, fue construido en la Universidad de Columbia Británica en 1932. En 1934 se construyó uno más práctico. Modelos posteriores se utilizaron durante varios años, hasta que fueron remplazados por centillómetros (figura 3).



Figura 3. Centillómetro, spp2 2-NF (izquierda). Gamma espectrómetro GS-512 canales (derecha)

Fotografía: Servicio Geológico Colombiano

Espectrómetro de rayos gamma. El primer detector aerotransportado de minerales radiactivos fue propuesto por el geofísico Ridland en 1943. En 1947 se hicieron los primeros ensayos de registros aerotransportados con cámaras de ionización y contadores Geiger. La primera patente para un espectrómetro de rayos gamma portátil fue registrada bajo la firma de Roulston & Brownell de la Universidad de Manitoba en 1949.

El espectrómetro de rayos gamma es actualmente la primera técnica de prospección de uranio aplicada mundialmente para el levantamiento de mapas geológicos, exploración mineral y monitoreo ambiental.

La gamma-espectrometría permite establecer la fuente de radiactividad de uranio (U), torio (Th) y potasio (K), así como el conteo total de radiaciones por unidad de tiempo presentes tanto en la atmósfera como en las rocas.

Según el tipo de depósito, se emplean las siguientes técnicas de exploración:

Geoquímica. Uranio, niquel, cobalto, cobre, molibdeno, bismuto, arsénico y plata son buenos indicadores que se pueden utilizar en la prospección con base en muestras de sedimentos activos, sedimentos lacustres y suelos. Muestras de aguas de corrientes y fondos de lagos se pueden analizar para uranio y radio. Gases inertes como helio y radio pueden ser detectados en relación con fuentes ricas de uranio en la prospección de suelos y gases en suelos, así como en aguas subterráneas y corrientes.

Bolívar (1980), en su informe del Programa Nacional de Evaluación de Recursos Uraníferos de Estados Unidos, describe como principales elementos guías (*pathfinder*) en el reconocimiento geoquímico del uranio el molibdeno, azufre, plomo, arsénico, vanadio, zinc, cobre, níquel, cobalto y torio. Además, propone la utilización de otros elementos, como oro, estaño y tungsteno. Respecto a los elementos de las tierras raras, estos proveen una base conceptual sólida en las investigaciones sobre movilización y génesis de las mineralizaciones asociadas (tabla 5).

Tabla 5. Elementos indicadores y exploradores de algunos tipos de depósitos minerales

Asociación de menas	Elemento indicador	Elemento explorador
Uranio en areniscas	U	Se, Mo, V, Rn, He, Cu, Pb
Uranio en vetas	U	Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni, Pb, F

Fuente: Griem (2016)

Geofísica. Agrupa técnicas comunes de prospección usando rayos gamma, escintilómetros y espectrómetros para detectar mineralizaciones *in situ* o en depósitos glaciares, taludes y otros depósitos detríticos. Métodos magnéticos pueden ser usados para detectar áreas en donde a magnetita ha sido alterada a hematina en las paredes de las rocas de caja en exploración de venas.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se realiza la descripción de los sistemas de explotación y procesamiento del uranio.

2.4.1. Sistemas de explotación

Como en otros tipos de minería de rocas duras, en las minas de uranio se utilizan varios métodos, de los cuales los más comunes son los de cielo abierto y la explotación subterránea.

La explotación a cielo abierto se practica en depósitos superficiales donde la cubierta estéril que se superpone al mineral que se va a explotar (*overburden*) es relativamente delgada o tiene condiciones no favorables para practicar túneles. Es el caso de arenas, cenizas y gravas. La profundidad de la explotación típica es de 120 m. En este tipo de mina, el material estéril superpuesto a la mena se remueve con barrenos o taladros y con explosivos, cuando es necesario, y se retira en volquetas o cualquier otro medio, hasta dejar la mena al descubierto. En general, en el proceso de arranque se utiliza agua para controlar el polvo.

Cuando el mineral no está cerca de superficie, se recurre a la explotación subterránea por medio de túneles y pozos utilizados para accesos y para remover el material. El material de ganga es naturalmente menor que el que se remueve en explotaciones a cielo abierto. La explotación subterránea de minerales de uranio presenta problemas, como la presencia de radón, altamente tóxico.

La explotación subterránea, en principio, no es diferente de la explotación de cualquier otro mineral en rocas duras. Cuando el cuerpo mineralizado se ha identificado, se excava un pozo en las vecindades y luego se practican guías y sobreguías horizontales siguiendo el cuerpo mineralizado. La separación entre las guías varía de 100 a 150 m. Luego se utilizan galerías ascendentes o descendentes (tambores) que unen las guías y sobreguías de forma que el cuerpo mineralizado queda cortado en polígonos llamados *pilares*, limitados por tambores y guías o sobreguías, espacios vacíos denominados *cámaras*. Este proceso se denomina *preparación de la explotación*. Los tambores generalmente siguen la inclinación de la mena o vena mineralizada; en consecuencia, pueden ser verticales o tener otra inclinación.

Luego se utilizan varios métodos para la explotación propiamente dicha, de los cuales el más conocido es el de cámaras y pilares, en el que se va extrayendo el mineral sacando un pilar limitado por dos sobreguías y dos tambores, y dejando el siguiente pilar como soporte del techo de la mina. Este sistema ofrece múltiples alternativas que dependen de la resistencia del techo, medios de los que se dispone, costos de operación, etc. Las diferentes alternativas buscan la mejor y mayor recuperación del mineral de mena. El mineral es arrancado por diferentes métodos (martillos picadores, voladuras, arranque mecánico, etc.), dependiendo de su dureza, ancho de la mena, resistencia de las paredes, etc. El material se transporta en vagonetas manuales o mecanizadas sobre rieles; si hay necesidad, se iza a superficie por medio de *winches*.

Para las minas de uranio, y algunos otros minerales, se utiliza otro método de explotación conocido como *lixiviación de pilas o rimeros*. Residuos de roca estéril generalmente se

producen al levantar las rocas que recubren una mena superficial *(overburden*) o, en la explotación subterránea, al excavar túneles de acceso en roca no mineralizada. Igualmente, se pueden presentar estériles cuando el mineral o mena no tiene la suficiente concentración para su proceso normal o cuando se extrae material de transición entre una vena mineralizada y la pared o roca de caja. Montones o pilas de estos estériles o colas pueden contener elevadas concentraciones de radioisótopos, comparados con una roca normal. Estas pilas de estériles, después del abandono de la explotación, atentan contra la salud de la gente y contra el medio ambiente debido a la liberación de gas radón y la infiltración de aguas que pueden contener materiales radiactivos y tóxicos.

En muchos de estos casos se utiliza la lixiviación de pilas para remover el uranio de muy bajo grado. El líquido para la lixiviación (a menudo ácido sulfúrico) se introduce en el techo de la pila y se percola a lo largo de esta hasta que alcance la base del depósito, donde es recogido y bombeado a una planta de procesamiento. Debido al potencial y al extremo daño causado al medio ambiente con este proceso, su práctica ha desaparecido casi totalmente.

La lixiviación *in situ* (ISL), algunas veces denominada recuperación *in situ* (ISR), se realiza bombeando un líquido (ácido o alcalino de baja concentración, dependiendo de la concentración de calcio en la mena) a través de un pozo de inyección localizado en un extremo del depósito de uranio, el cual es recuperado por otro pozo localizado en el extremo opuesto del depósito. El método ISL se usa igualmente en otros tipos de depósito, como en los de cobre. Este método es rentable debido a que se evitan excavaciones costosas y a que puede implementarse más rápidamente que los métodos tradicionales. Sin embargo, no es deseable para todos los depósitos de uranio, por ejemplo, cuando la roca huésped o de caja es permeable (como es a menudo el caso de las areniscas).

Estudios de impacto ambiental deben llevarse a cabo cuando se va a utilizar el método ISL, debido a que las aguas subterráneas pueden resultar afectadas. La lixiviación *in situ* es el único tipo de minería de uranio que se realizan en los Estados Unidos.

Recuperación de uranio del agua de mar: **l**a concentración de uranio en el agua de mar es baja, aproximadamente de 3.3 mg/m^3 de agua (3.3 ppb). Pero las cantidades de este recurso son gigantescas (4.5 billones de toneladas), y algunos científicos sostienen que este recurso es prácticamente ilimitado con respecto a la demanda mundial. A pesar de que desde la década de los sesenta, en el Reino Unido, Francia, Alemania y Japón se han realizado investigaciones y desarrollado técnicas para recuperar tan bajas concentraciones de uranio por medio de absorbentes inorgánicos, como los compuestos de óxido de titanio, esta investigación prácticamente se ha detenido debido a la baja eficiencia del recobro.

En el Takazaki Radiation Chemistry Research Establishment del Japan Energy Research Institute (Jaeri), las investigaciones y desarrollos han culminado en la producción de absorbentes por irradiación de fibras de polímeros. Los absorbentes se han sintetizado para obtener un grupo funcional (*amidoxime group*) que absorbe selectivamente metales pesados. Su desempeño ha sido mejorado. La capacidad de absorción del uranio de las fibras de polímeros absorbentes es alta, aproximadamente diez veces mayor en comparación con el absorbente de óxido de titanio. Para un futuro próximo se planean realizar instalaciones comerciales.

2.4.2. Procesamiento de minerales

El procesamiento de mineral de uranio depende del uso que vaya a dársele. De acuerdo con esta premisa, se considera que el uranio tiene dos usos principales: combustible para reactores nucleares que se utilizan en usos pacíficos y utilización en la industria militar.

2.4.2.1. Procesamiento para usos pacíficos. El ciclo de combustible nuclear

El uranio para usos pacíficos tiene dos propósitos principales: como combustible en reactores nucleares, para producir electricidad y como medio de producir isótopos radiactivos para usos médicos y otras aplicaciones.

El ciclo del combustible nuclear consiste en la secuencia de procesos desde la minería hasta la disposición final de materiales de desecho, generalmente asociados a la producción de electricidad por medio de reactores nucleares. Las etapas o ciclos del proceso son los siguientes:

- Minería y molienda de la mena de uranio
- Conversión y enriquecimiento del uranio
- Fabricación del combustible de acuerdo con los requerimientos de los reactores
- Fisión en un reactor para generar energía, o producir radioisótopos para usos médicos, industriales o investigaciones
- Reprocesamiento de los elementos de combustibles usados
- Disposición y almacenaje de residuos

Minería y molienda de la mena de uranio: la minería del uranio se expuso en el aparte anterior (3.4.1 Sistemas

de explotación), en el que se trataron además otros métodos de obtención del uranio. El mineral extraído de la mina es molido para extraer el uranio. Si el mineral es pechblenda, el procedimiento clásico para extraer el uranio consiste en triturar y enriquecer el mineral por flotación. Luego se mezcla con ácidos sulfúrico y nítrico, con lo cual el uranio se disuelve para formar sulfato de uranilo (UO_2SO_4). El radio y los otros metales se precipitan como sulfatos. Mediante la adición posterior de hidróxido de sodio, el uranio se precipita como diuranato de sodio ($Na_2U_2O_7.6H_2O$), conocido como *óxido amarillo de uranio*, un polvo amarillo brillante que también suele llamarse *torta amarilla*. Esta torta se seca y calienta para obtener un polvo fino blanco que contiene más del 98 % de U_3O_8, que es empacado en barriles de 205 litros.

Cuando el mineral es la carnosita, se tritura finamente y se trata con una solución caliente de sosa cáustica y potasa para disolver el uranio, el radio y el vanadio, que luego se separan. El uranio extraído se purifica por diversos métodos, principalmente por formación de haluros u óxidos que se reducen con magnesio, calcio, aluminio o carbón a altas temperaturas (figura 4).

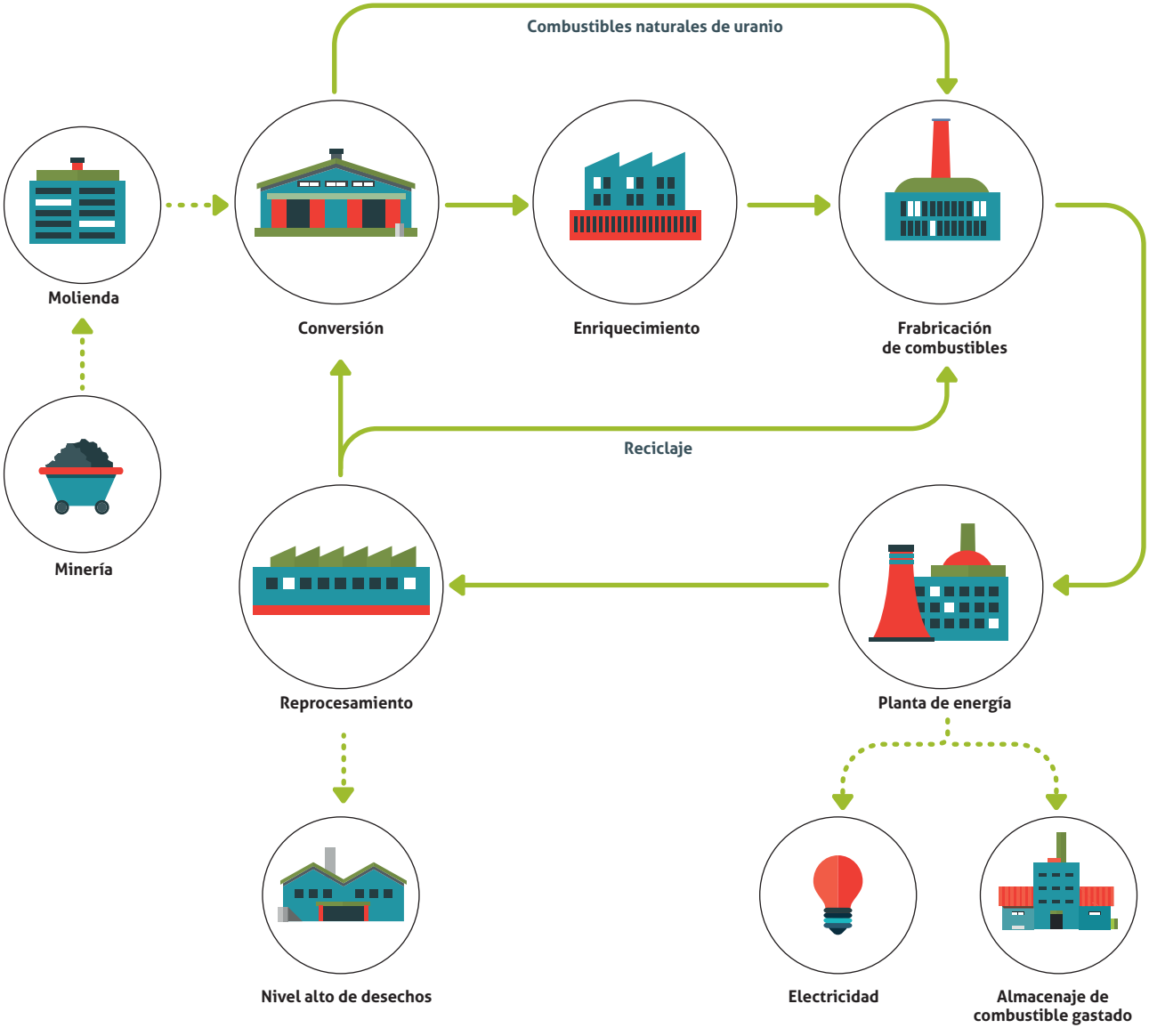


Figura 4. Esquema del ciclo del combustible nuclear.

Fuente: Department of the Prime Minister and Cabinet, Uranium Mining (2006)

El metal también puede ser producido por electrólisis de KUF_5 o UF_4, disuelto en mezcla fundida de $CaCl_2$ y NaCl.

Estos métodos clásicos de extraer el uranio desde sus minerales han sido reemplazados en la práctica actual por procedimientos como la difusión gaseosa (figura 5), utilizada actualmente en los Estados Unidos; la centrifugación (figura 6), en la cual el hexafluoruro de uranio gaseoso se separa en centrífugas en cascada; el proceso de difusión térmica líquida; la boquilla de separación; la excitación láser; extracción solvente; cambio iónico y métodos de volatilidad selectiva.

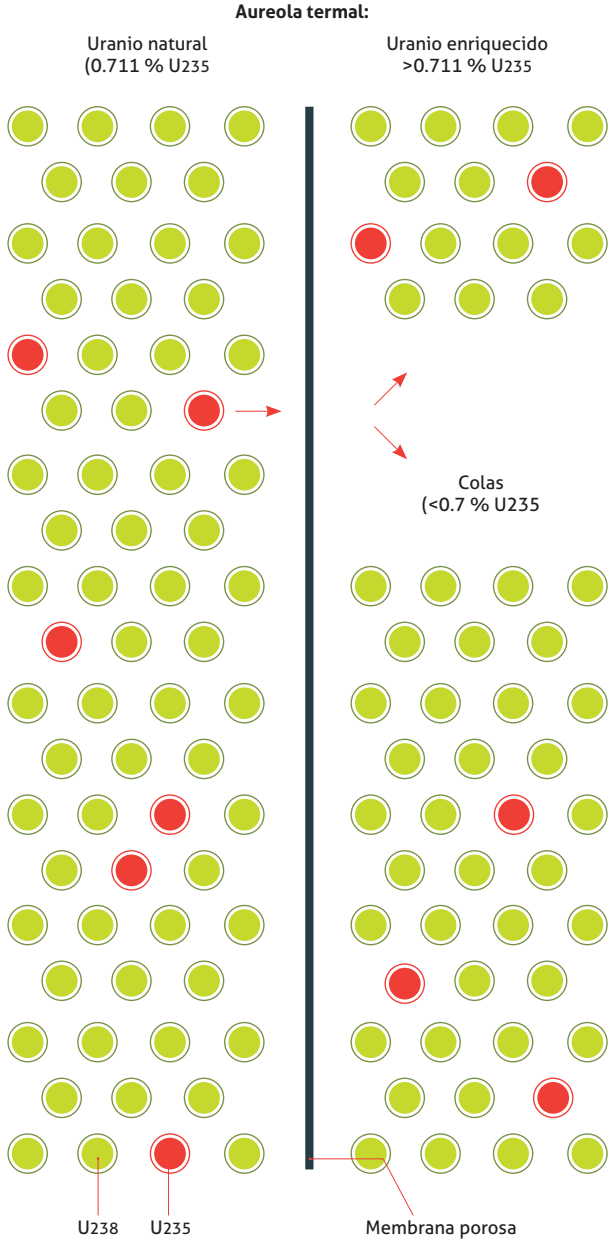


Figura 5. Proceso de extracción por difusión gaseosa.

Fuente: Calderón (2006)

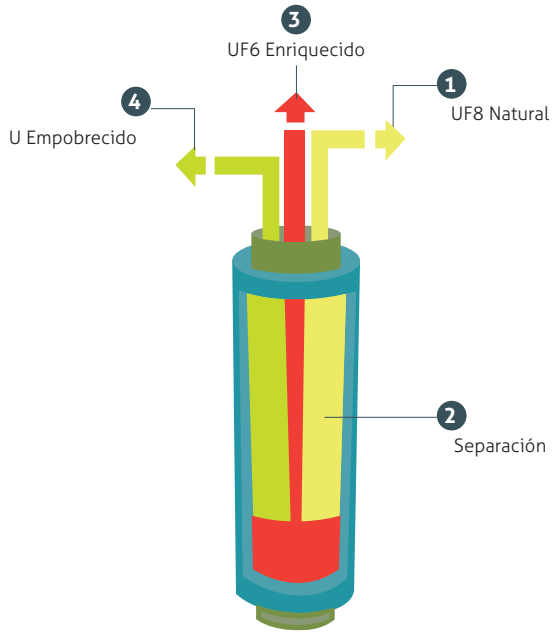


Figura 6. Proceso de extracción por centrifugación

Fuente: Calderón (2006)

La preparación del uranio de alta pureza se realiza mediante la descomposición térmica de sus haluros sobre un filamento incandescente.

El uranio obtenido por cualquiera de los procesos expuestos se funde para comercializarlo en lingotes de metal puro o aleado según el uso que vaya a dársele.

El sobrante del mineral tratado se almacena en instalaciones cerca de la mina. Estos depósitos contienen materiales radiactivos de larga vida en concentraciones bajas, y materiales tóxicos, como minerales pesados. Sin embargo, el total de los elementos radiactivos es menor que el contenido en el mineral original y su radiactividad colectiva puede ser de vida más corta. Este material es aislado del medio ambiente por un periodo suficiente para permitir bajar la radiactividad a niveles normales.

Cuando la minería y la molienda se han completado, las colas o material sobrante de los procesos se cubren con arcilla y material de suelo para permitir que crezca la vegetación y la radiactividad se reduzca a los niveles existentes cerca del cuerpo mineralizado. Las colas también pueden ser filtradas y llevadas a un estado seco. Estos sólidos son dispuestos en depósitos subterráneos.

Conversión y enriquecimiento del uranio. El producto obtenido por los métodos descritos no se utiliza como combustible en los reactores nucleares. En la mayoría de los reactores se necesitan procesos adicionales denominados *de enriquecimiento*. El proceso requiere uranio en forma

gaseosa, y esto se alcanza por conversión del producto UOC en hexafluoruro de uranio (UF_6), un gas a temperatura relativamente baja. Para esta conversión se refina el uranio y se lleva a dióxido de uranio (UO_2), el cual puede usarse como combustible en algunos tipos de reactores que no requieren el uranio enriquecido. La mayor parte del uranio es convertido en UF_6, listo para las plantas de enriquecimiento.

El uranio natural está formado por tres isótopos. Solamente el 0.715 % del uranio natural es fisible o capaz de someterse a fisión. El isótopo fisible es el uranio ^{235}U, mientras que la mayor parte del sobrante es uranio ^{238}U.

La mayoría de los tipos comunes de reactores requieren uranio 235 de alta concentración. El proceso de enriquecimiento produce una alta concentración de ^{235}U en porcentajes comprendidos entre 3.5 y 5 % de este isótopo, remueve más del 85 % del ^{238}U. Esto se logra por la separación de hexafluoruro de uranio (UF_6) en dos porciones: la que tiene más ^{235}U que lo normal, conocida como *uranio enriquecido*, y la que tiene menos ^{235}U que lo normal, denominada *cola* o *uranio empobrecido*. Como es natural, el uranio natural enriquecido es el más radiactivo.

Fabricación del combustible de acuerdo con los requerimientos de los reactores. El combustible de los reactores se presenta generalmente en forma de pelotillas (*pellets*). Estas se forman sometiendo a presión el UO_2, que es sinterizado (cocción) a alta temperatura, sobre los 1400 °C. Los *pellets* se encajan en tubos de metal con forma de barras de combustible, los cuales se colocan dentro de un armazón de combustible listo para introducirlo al reactor. Las dimensiones de los *pellets* y del armazón se controlan con precisión para garantizar la consistencia del combustible empacado.

Generación de energía. En el interior del reactor el núcleo del átomo de ^{235}U se rompe (fisión) y libera energía. Esta se utiliza para calentar agua y convertirla en vapor. El vapor mueve una turbina conectada a un generador que produce electricidad. Alguna parte del ^{238}U se transforma en plutonio en el centro del reactor (plutonio –239, que se forma cuando el isótopo ^{238}U absorbe un neutrón) y produce cerca de una tercera parte de la energía en un reactor nuclear típico. La fisión del uranio se utiliza como fuente de calor en una estación de energía nuclear de la misma manera que cuando se quema carbón, gas o aceite en una planta de combustibles fósiles.

Con el tiempo, la concentración de fragmentos de la fisión (tales como bromo, iodinio y cesio, entre otros, que se producen al partirse el átomo de ^{235}U) y elementos pesados forman, así como el plutonio, un "paquete de combustible" que se incrementa hasta el punto de que no es práctico el uso del combustible. Después de dieciocho a veinticuatro meses, el "combustible gastado" se remueve del reactor. La cantidad de energía que se produce con un paquete de combustible varía con el tipo de reactor y la política del operador del reactor.

Almacenaje del combustible usado. Cuando se remueve del reactor un paquete de combustible, puede emitir radiaciones, principalmente fragmentos de fisión y calor. El combustible usado es descargado inmediatamente en un estanque de almacenaje, adyacente al reactor, para permitir que los niveles de radiación decrezcan. En el estanque, el agua protege la radiación y absorbe el calor. El combustible usado se retiene en estos charcos por meses o por años.

Dependiendo de las políticas particulares de los países, algunos combustibles usados pueden ir a instalaciones centrales de almacenamiento. Finalmente, estos combustibles usados pueden ser reprocesados o preparados para llevarlos a un depósito permanente.

Reprocesamiento. En las instalaciones de reprocesamiento, el combustible usado se separa en tres componentes: uranio, plutonio y residuos (que contienen productos de fisión). El reprocesamiento permite el reciclaje de uranio y plutonio en un combustible nuevo; con esto se consigue una reducción significativa de residuos.

El combustible usado tiene cerca de 95 % de ^{238}U, pero solo contiene 1 % de ^{235}U, que no se fisiona, cerca de 1 % de plutonio y 3 % de productos altamente radiactivos que se fisionan con otros elementos transuránicos formados en el reactor.

Reciclaje de uranio y plutonio. El uranio para reprocesamiento, que contiene concentraciones un poco más altas que el ^{235}U tal como aparece en la naturaleza, puede volver a usarse como combustible, si es necesario, después de someterlo a conversión y enriquecimiento. El plutonio puede ser directamente producido dentro de una mezcla de combustible oxidado (MOX), en el cual los óxidos de uranio y plutonio están combinados. En reactores que usan combustible MOX, el ^{239}U sustituido por ^{235}U en un combustible normal oxidado de uranio.

Disposición de combustibles usados. El combustible usado largamente se almacena. Este es el manejo más fácil, debido a la disminución progresiva de la radiactividad. Después de cuarenta a cincuenta años de almacenamiento, el nivel de radiactividad del combustible desciende al 0.1 % del nivel

original. Este descenso, y el hecho de que los volúmenes de desechos no son relativamente grandes, han permitido que las instalaciones de depósitos finales (como oposición a las instalaciones para almacenamiento) no hayan operado hasta que los programas de energía nuclear civil fueran creados. Hay, además, poca disposición al almacenamiento de combustibles usados, ya que estos representan un recurso significativo de energía que puede ser reprocesado más tarde por reciclaje del uranio y el plutonio.

Se han desarrollado técnicas relacionadas con problemas de disposición, y varios países han determinado sus propias técnicas optimizadas para la disposición de residuos que van a reprocesarse. El más común y favorable método de disposición es el emplazamiento en depósitos geológicos profundos. Varios países construyen actualmente depósitos nacionales para los residuos de combustibles usados.

2.4.2.2. Ciclo de combustible militares

El ciclo de combustibles militares que involucra la producción de grados especiales de material nuclear es sustancialmente diferente del seguido en los programas civiles, principalmente en lo relacionado con el plutonio y el grado de uranio para armamento. Mientras que los reactores nucleares requieren uranio enriquecido no mayor del 5 %, el armamento nuclear necesita ^{235}U enriquecido aproximadamente al 90 %. El grado de plutonio para armamento se produce en reactores específicos —generalmente combustible natural de uranio—, en los que el combustible irradiado puede ser removido después de un corto tiempo de irradiación.

2.5. Recursos, reservas y comercio

Datos tomados de la Organization for Economic Cooperation and Developement (OECD, 2016), indican que los recursos adicionales estimados en 2015 eran de 7.7 millones de toneladas de uranio en la categoría que corresponde a <USD 260/kgU, y 5.7 millones de toneladas de uranio <USD 130/kgU.

2.5.1. Recursos y reservas

Esta misma fuente indica que esas cifras registran un incremento de 0.1 % y un decrecimiento del 3.1 %, respectivamente, entre 2013 y 2015, debido a la revaluación de los recursos identificados. La tabla 6 muestra el total de los recursos identificados en 2013 y 2015.

La convención internacional para el reporte de reservas divide las estimadas en dos categorías, basadas en el nivel de confiabilidad y en las cantidades reportadas: recursos razonables asegurados, que pueden recuperarse con costos razonables de producción, y recursos inferidos, uranio que se cree existe, con base en evidencias geológicas directas. Estos recursos se clasifican también en categorías basadas en los costos de producción de U_3O_8:

- < USD 40/kgu (aproximadamente USD 15/lb U_3O_8)
- < USD 80/kgU (aproximadamente USD 30/lb U_3O_8)
- < USD 130/kgU (aproximadamente USD 50/lb U_3O_8)
- < USD 260/kgU (aproximadamente USD 100/lb U_3O_8)

Tabla 6. Recursos de uranio identificados en el mundo (2013 y 2015)

	Total de recurso de uranio identificado (miles toneladas U_3O_8) [1, 2]				
	< USD 40/kg	< USD 80/kg	< USD 130/kg	< USD 260/kg	Año
Recursos mundiales	682.9	1956.7	5902.9	7635.2	2013
	646.9	2124.7	5718.4	7641.6	2015

[1] Los recursos hacen referencia a datos de enero del 2013 y enero del 2015; los recursos estimados se expresan en términos de toneladas de U_3O_8 recuperables del mineral de mina (los recursos estimados incluyen descuentos por las pérdidas por dilución de la mena, minería, y molienda).

[2] Total de recursos identificados = recursos razonablemente asegurados + recursos inferidos.

Fuente: OECD (2016)

Según la OECD (2016), las principales reservas de uranio se encuentran distribuidas así: Australia con 29 %, Kazajistán con 13 %, Canadá y Rusia con 9 %, y Suráfrica con 65 %. En Latinoamérica, las principales reservas las tiene Brasil, con un 5 % de las reservas globales de uranio

2.5.2. Comercio

Producción. La producción de uranio primario se inició hacia 1945, principalmente por necesidades militares. Esta satisfizo las necesidades o el consumo mundial hasta 1989, aproximadamente, y dejó excedentes que se constituyeron

en reservas estratégicas. Después de 1989, la producción mundial de uranio descendió debido a la declinación de los precios, y ya no satisfizo el consumo. En 1995 la producción de uranio primario solo alcanzó el 50 % de consumo; el resto se suplió de la producción secundaria.

En 2015 la producción de uranio fue 60 500 t; Kazajistán fue el mayor productor mundial, con 23 800 t, seguido por Canadá con 13 200 t y Australia con 5600 t. En la tabla 8 se muestra la producción mundial de uranio por países en el periodo 2011-2015 (tabla 7).

Tabla 7. Producción mundial de minas de uranio y principales países productores de uranio, período 2011-2015 (toneladas de uranio contenido)

País	2011	2012	2013	2014	2015
Rusia	2933	2862	3135	2990	3055
Ucrania	890	960	922	926	1200
Namibia	3262	4500	4328	3311	2950
Nigeria	4159	4821	4277	4156	4116
Canadá	9145	8998	9331	9101	13 324
Estados Unidos	1537	1596	1794	1884	1287
Kazajistán	19 451	21 317	22 567	23 127	23 800
Uzbekistán	3000	3000	2400	2400	2385
Australia	5961	7022	6370	5634	5655
Otros	3362	4124	4176	3371	2728
Total mundial	53 700	59 200	59 300	56 900	60 500

Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)

Como se puede observar en la figura 7, la producción en 2015 la encabezaba Kazajistán con una participación del 39 %; le seguía Canadá, en un su segundo lugar, a lo largo del período, con un 22 %, y en tercer lugar, Australia, con un 9 %. En la figura 7, se muestra la participación de países en la producción mundial de uranio porcentual en 2015, y en la figura 8 se observa la producción de los cuatro principales países productores del mundo en el mismo periodo.

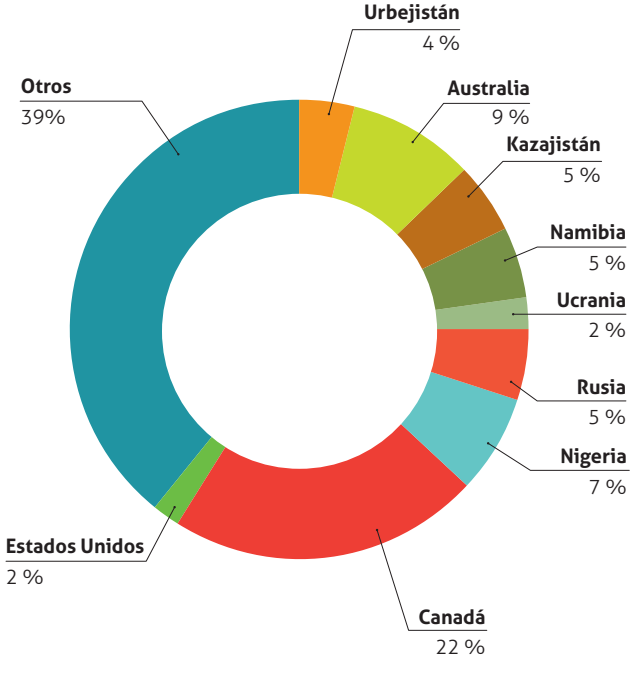


Figura 7. Participación de producción mundial de uranio en 2015

Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)

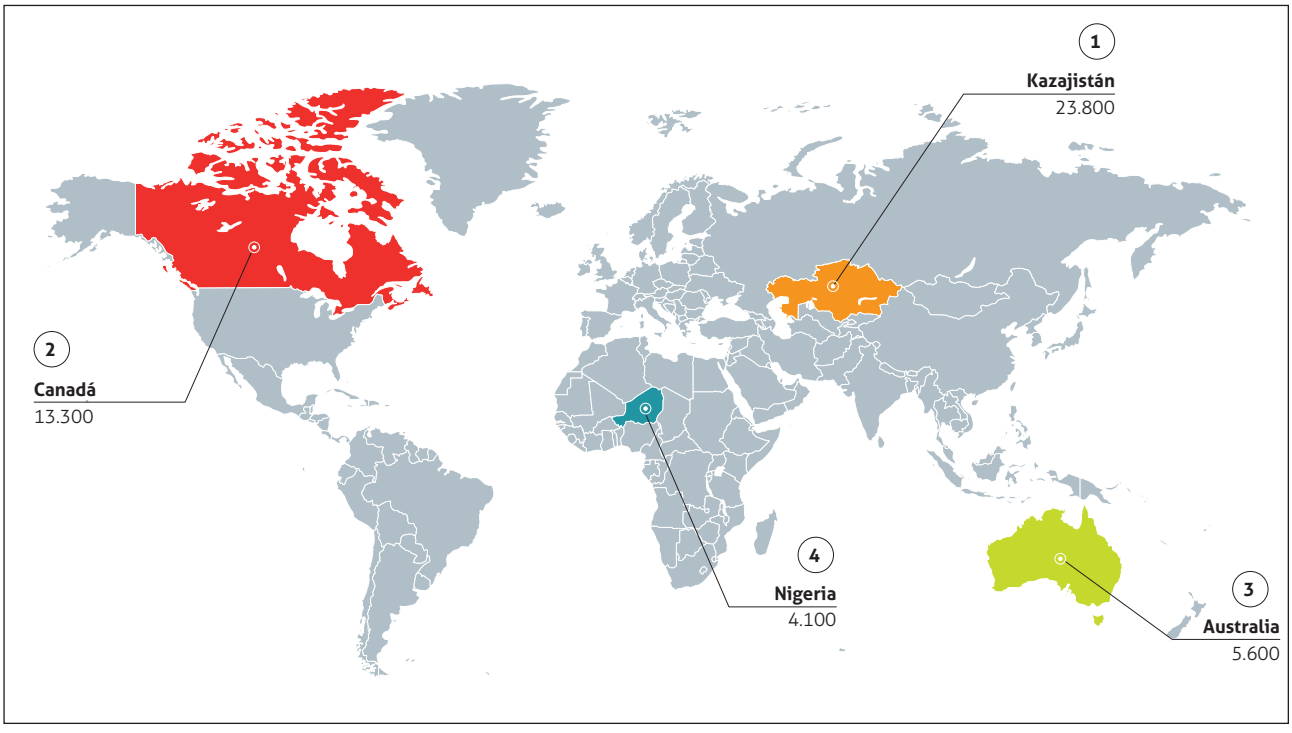


Figura 8. Principales países productores de uranio en 2015

Fuente: Brown, Raycraft, Deady y Hobbs (2017)

Precios del uranio. La relativa disponibilidad de suministro de uranio primario y secundario, conjuntamente con el nivel de demanda de este elemento para usos civiles y militares, ha determinado el precio del uranio desde la década de los cuarenta del siglo pasado. Se citan recursos que identifican tres periodos en la historia del precio del uranio:

- Una era de adquisición para armamento (1940-1969)
- Una era de inventarios de acumulación (1970-1984) y
- Un periodo de liquidación de inventarios (1985-2004)

Durante los dos primeros periodos el uranio fue suministrado casi en su totalidad por la producción de las minas; el precio promedio del uranio fue USD $54.18/lb de U_3O_8, con un pico de USD $110/lb en 1976. Durante el periodo de liquidación de inventarios, el precio de entrega inmediata cayó a un promedio de USD $14.57/lb de U_3O_8, debido a la disponibilidad en el mercado de uranio secundario. Los expertos creen que el efecto de la liquidación de inventarios fue una depresión artificial del precio en un periodo en el que el suministro de las minas declinó y la demanda se incrementó.

El análisis del mercado indica que la disminución del suministro de uranio secundario tiene ahora una influencia significativa en el precio del mismo. Esta disminución ejerce una fuerte presión en el alza del uranio de entrega inmediata, y dobló el precio en el periodo comprendido entre finales de 2002 y finales de 2004. Según la consultora estadounidense UX, el precio se incrementó en un 109 % desde octubre de 2006 hasta mediados de abril de 2007, pues pasó de costar 55 dólares a 115 dólares. Según el portal de información de la OECD (2016), en 2015 el precio de la libra del uranio fue de aproximadamente USD $40. Este descenso se debió al accidente nuclear ocurrido en la planta de Fujishima en el año 2011.

El comportamiento histórico de los precios reales y nominales del uranio en el periodo 1982-2015 se muestra en la figura 9.

2.6. Perspectivas

Según la OECD (2016), en el periodo comprendido entre el 2013 y el 2015, la demanda de uranio disminuyó considerablemente y fue igualada por la producción, debido al accidente de la planta de Fujishima en Japón, ante el cual muchos de los reactores del mundo iniciaron procesos de mantenimiento para evitar este tipo de impases. En la figura 10 se observa la relación de producción versus la demanda en el periodo 1949-2015; se espera que en los próximos años la demanda vuelva a incrementarse, debido a la entrada en operación de nuevos reactores nucleares.

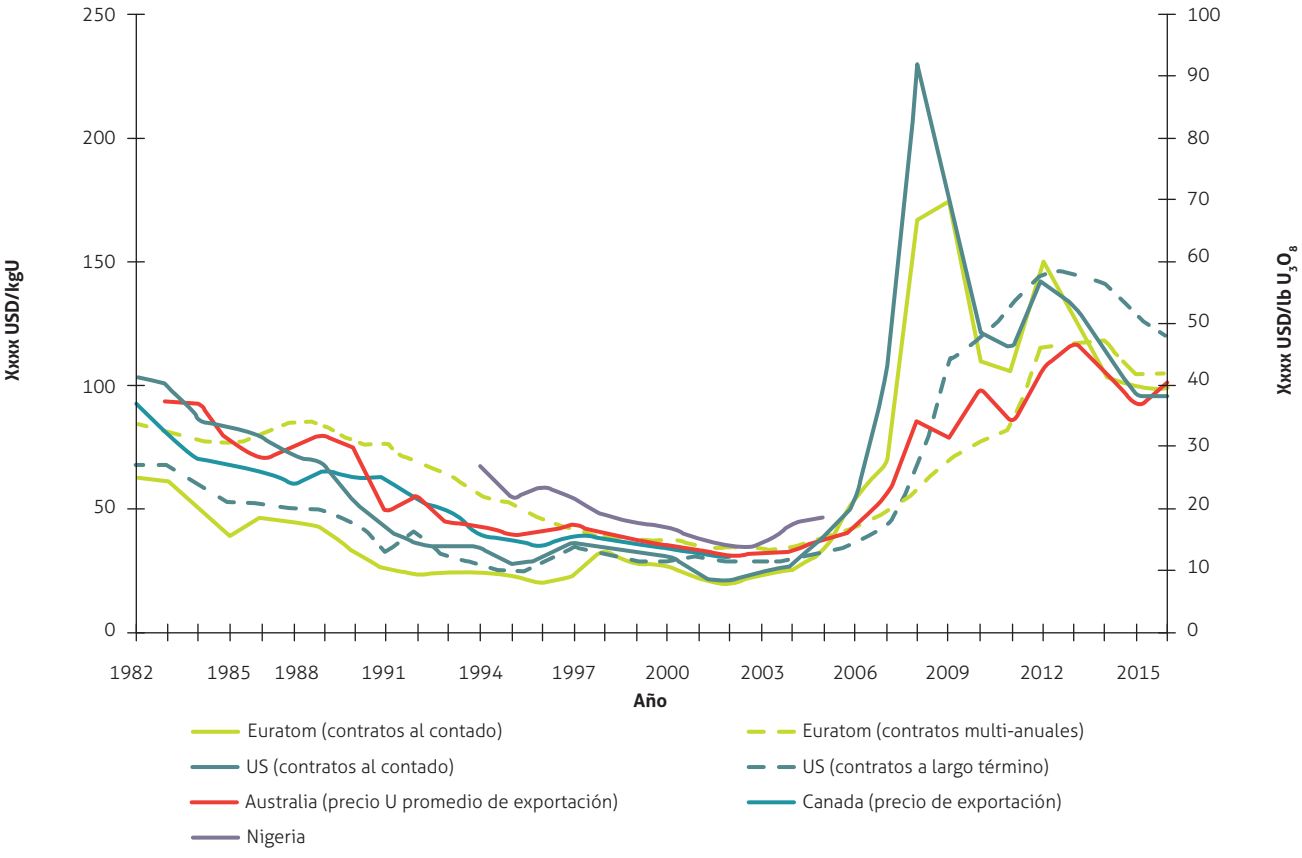


Figura 9. Comportamiento de los precios del uranio entre 2005 y 2007

Fuente: OECD (2016)

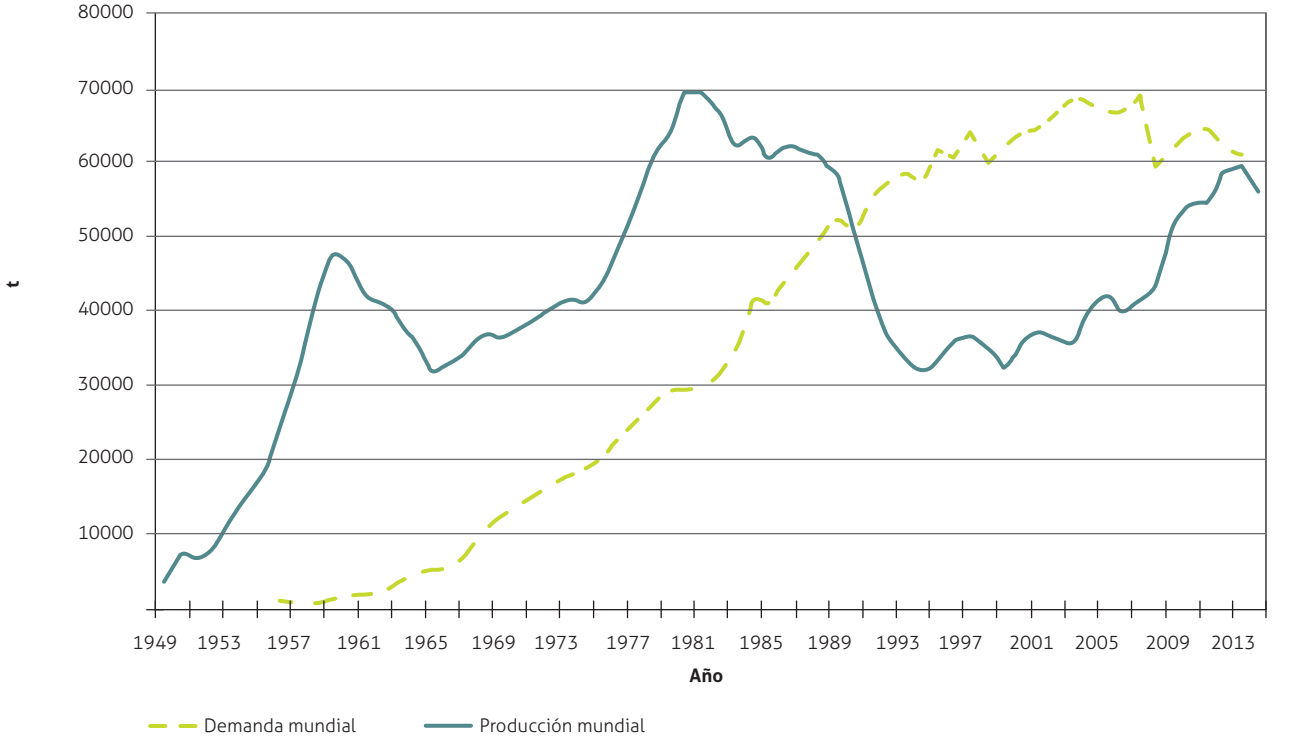


Figura 10. Relación de producción vs. demanda de uranio en el periodo 1949-2015.

Fuente: OECD (2016)

En cuanto al uranio que, según estimaciones, los reactores nucleares podrían demandar de aquí al año 2035 (figura 11), se tiene que con los niveles actuales de producción en un escenario bajo, la oferta sería suficiente; sin embargo, en un escenario de alto consumo habría un déficit en la producción, que sería necesario suplirlo con el reciclaje de los combustibles de las plantas nucleares. En lo que respecta al tema de reservas, para el año 2035 solo se afectaría un 30 % de las estimadas en 2015.

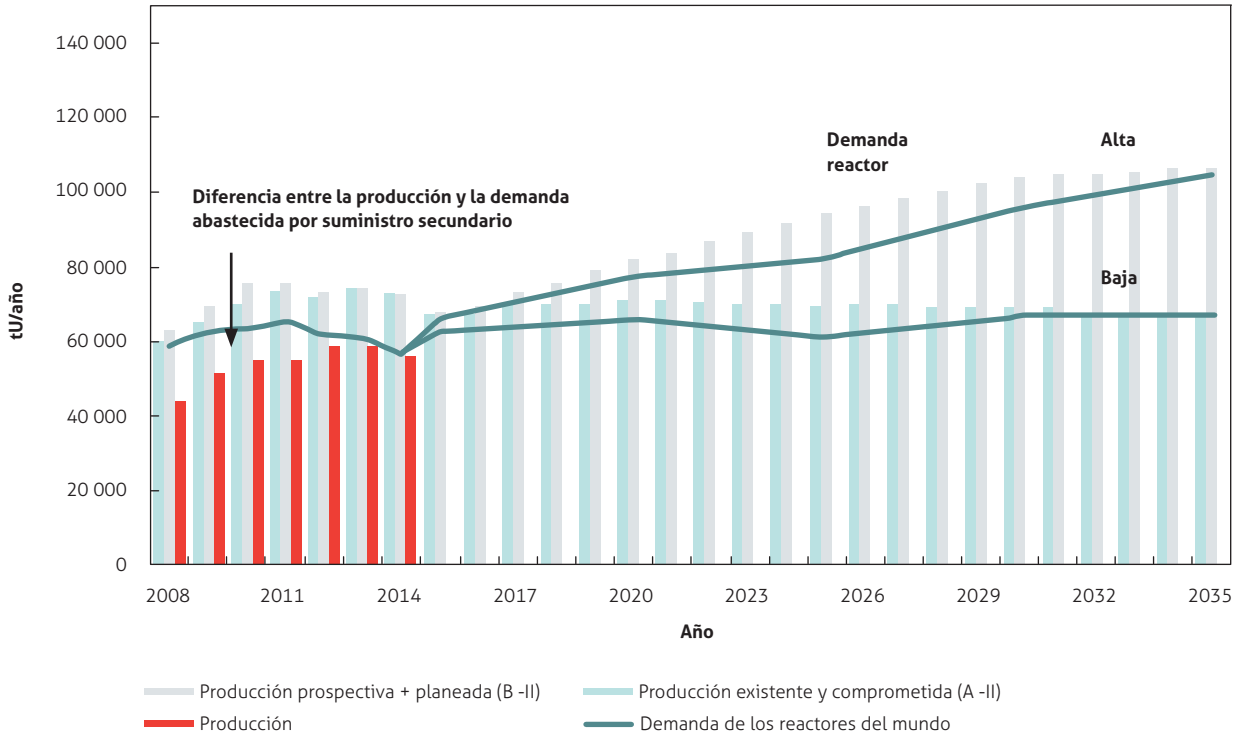


Figura 11. Proyección de la producción mundial de uranio y demanda de reactores nucleares hasta el año 2035

Fuente: OECD (2016)

3. Uranio en Colombia

En este capítulo se describirá el estado actual de la geología y minería del uranio en Colombia.

3.1. Geología regional

La geología colombiana es compleja, pues cuenta con unidades geológicas que tienen posibilidades de presentar altos contenidos de radiactividad que representen mineralizaciones uraníferas, principalmente en rocas de la cordillera Oriental datadas entre el Precámbrico y el Cretáceo, con menos frecuencia en la cordillera Central y en algunos macizos que representen zonas de escudo, ambientes geológicos similares a los que se encuentran en otras partes del mundo.

3.2. Geología local

Las investigaciones específicas sobre uranio en Colombia las adelantó el Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), que coordinó el trabajo de varias compañías, como AGIP, Enusa, Total, Minatome, Cogema e Iaeay Coluranio.

Algunos autores, como Cortés y Pfeiffer, Ortega (1983) y Pacheco (1983) describen los ambientes geológicos uraníferos colombianos, que cubren aproximadamente un 90 % (1 024 312 km^2) del territorio nacional.

Resumiendo estos trabajos Premoli y Lozano (1984) señalan los siguientes tipos de mineralizaciones, según la roca huésped:

3.2.1.Pegmatitas

Aparentemente relacionadas con eventos metamórficos ocurridos durante el emplazamiento del macizo de San-

tander, se encuentran en localidades de los departamentos de Santander, Huila, Tolima, Antioquia y Caquetá. La anomalía más importante se localizó en Santa Elena (Norte de Santander), donde se reconoció uraninita localmente alterada a autunita. La manifestación se encuentra dentro de rocas metamórficas, facies esquistos verdes-anfibolitas de edad Ordovícico-Silúrico, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

3.2.2. Rocas piroclásticas

Se conocen algunas manifestaciones de niveles uraníferos en rocas terciarias de la localidad de Paipa, departamento de Boyacá. Según estudios de Enusa, las mineralizaciones de uranio están en desequilibrio geoquímico y se relacionan con las rocas efusivas de eventos del Mioceno-Plioceno. Las manifestaciones se encuentran en la roca vulcanoclástica continental de edad Mioceno- Plioceno del *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el año 2008, Ingeominas realizó una exploración en la zona de Paipa, Iza, Pesca y Chivatá con el fin de determinar las anomalías de uranio asociadas a eventos magmáticos que afectaron las rocas sedimentarias circundantes. El trabajo concluyó que hay un enriquecimiento en uranio y torio asociado a los fluidos hidrotermales de la cámara magmática, que se impregnaron en las rocas fosfáticas o asociado al material fósil de las formaciones sedimentarias presentes en la zona (Oviedo, Vásquez, Muñoz, Gómez, Parrado y Vargas, 2008).

3.2.3. Sedimentos marinos (shales y fosfatos)

La más importante mineralización de uranio en estas rocas está localizada en la población de Berlín, departamento de Caldas, y está relacionada con rocas fosfáticas dentro de *shales* negros epicontinentales del Cretáceo Inferior. El uranio se concentra en las areniscas fosfáticas con tenores promedio de 500 ppm, en espesores que varían de 1 a 3 m. La mineralización está dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad Cretácico Inferior, en el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

A todo lo largo de la cordillera Oriental, desde el departamento del Huila hasta Norte de Santander, y en el periodo Maastrichtiano, se encuentran manifestaciones de uranio relacionadas con niveles fosfáticos. La concentración de uranio en estos fosfatos es aproximadamente de 3 ppm de uranio por 1 % de P_2O_5. Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad comprendida entre el Cretácico Superior-Eoceno, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el año 2010 Ingeominas realizó una exploración en el área occidental del macizo de Santander. En un área de 3452 km^2 se encontraron valores anómalos de uranio y torio sobre partes puntuales de la formación Rosa Blanca, aunque no de importancia para realizar labores de exploración a detalle (Ávila, 2010).

En ese mismo año, Ingeominas realizó otra exploración de uranio en Moniquirá (Boyacá) en un área de 580 km^2, donde se encontraron dos anomalías en rocas de la formación Paja, asociadas posiblemente a la descomposición de la materia orgánica en los ambientes anóxicos hay presencia del mineral secundario de uranio como uranofana (González, Gómez, Muñoz y Vargas, 2010).

3.2.4. Areniscas

En los departamentos de Cundinamarca y Meta se han detectado ocurrencias de uranio y cobre conocidas como Quetame y Caño Negro. Se encuentran en una secuencia de arcillas, areniscas y conglomerados, posiblemente de ambiente marino deltaico, de aparente edad Carbonífera o Pérmica. Se asocian igualmente minerales como plata, zinc, cobalto y níquel. Las mineralizaciones son esencialmente lenticulares y presentan grandes variaciones laterales. Se reconocieron minerales como coffinita y pechblenda, con concentraciones del 1 % de uranio. Las mineralizaciones tienen un control estrictamente sedimentario y el depósito es típicamente singenético con control litológico. Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente transicional marino, de edad Devónico-Carbonífero, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

En el área de Zapatoca-Contratación y Lebrija, en el departamento de Santander, se presentan varias mineralizaciones de uranio. Estas manifestaciones están concentradas en el flanco este del anticlinal de Los Cobardes. Las mineralizaciones de uranio ocurren en areniscas del Jurásico (formación Girón) y se presentan en forma de lentes con variaciones laterales. Se identificó autunita y gummita. Se encuentran en general tres niveles con un intervalo de aproximadamente 100 m. Las mineralizaciones están dentro de la unidad rocas sedimentarias de ambiente continental, de edad Jurásico Superior Tardío, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006). El control de la mineralización es sedimentario, pero se observan algunas removilizaciones a lo largo de las fallas. Las mejores manifestaciones se encuentran en las quebradas Nogales, Santa Fe y Vitoca, localizadas entre Zapatoca y San Vicente, en el departamento de Santander.

Tamayo, Moreno y Bautista (2013), en el estudio realizado en el macizo de Quetame, encontraron una anomalía

de uranio asociada a areniscas de la formación Chipaque y la formación Capas Rojas, con valores de entre 6 y 12 ppm (con un valor anómalo de 92 ppm) de uranio y 20-32 ppm de torio, como se observa en la figura 12; estos autores sugieren que se deben realizar muestreos más densos en el área para determinar la procedencia de esta anomalía.

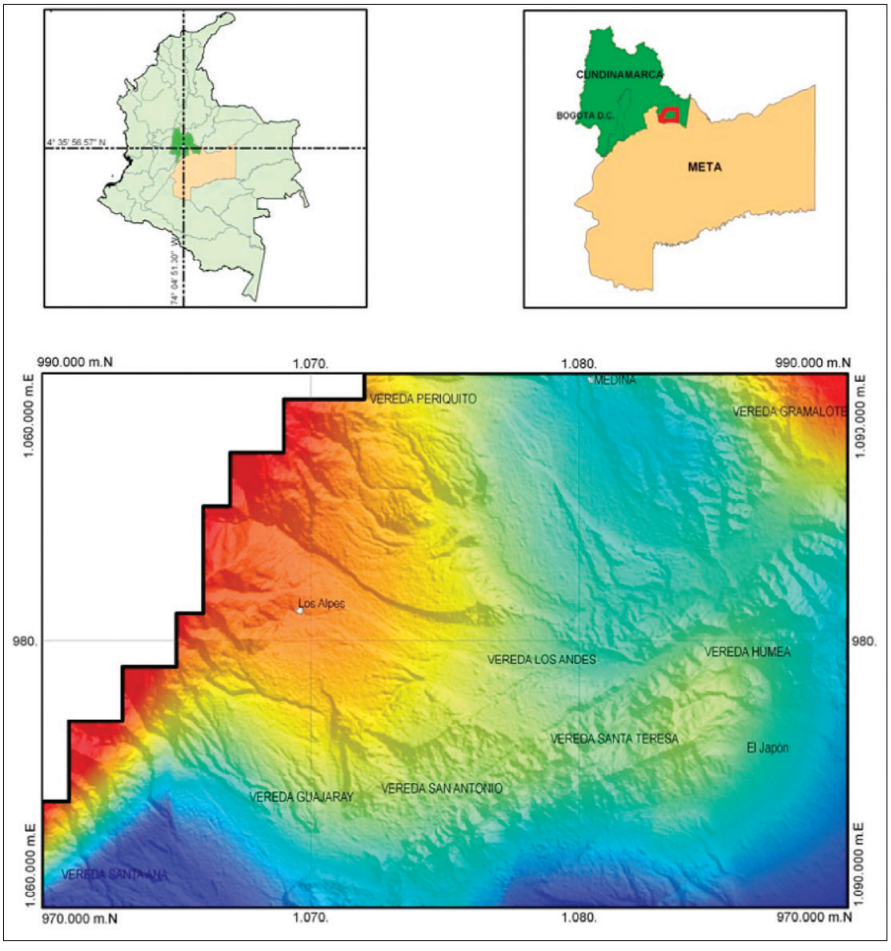


Figura 12. Distribución de uranio y torio en las formaciones Chipaque y Capas Rojas.

Fuente: tomado de Tamayo, Moreno y Bautista (2013)

3.2.5. Venas

Las mineralizaciones de uranio se presentan diseminadas en venas generalmente asociadas a zinc, oro, plata, plomo y cobre. El uranio se presenta como uraninita o pechblenda con cuarzo. Las mineralizaciones más conocidas son las de San Celestino, Las Ánimas, San Antonio, La Francia, tradicionalmente explotadas para oro, en el Distrito Aurífero de California, departamento de Santander, a unos 50 km al NE de Bucaramanga.

Se considera de edad pre-Devónica la roca huésped, y varios de los intrusivos de composición intermedia son del Triásico-Jurásico, mientras que varios de los cuerpos porfiríticos indican una edad Cretáceo Superior. No se tiene una datación de las mineralizaciones, pero pueden ser del Mesozoico. La mineralización están dentro de la unidad rocas metamórficas facies esquistos verdes-anfibolitas de edad Ordovícico-Silúrico, según el *Mapa geológico de Colombia* (Ingeominas, 2006).

Moreno, Díaz y Quintero (2011), en el estudio realizado en el macizo de Santander, encontraron una anomalía de uranio asociada a la cuarzomonzonita de Santa Rosita, con valores de entre 8 y 10 ppm de uranio y entre 37 y 54 ppm de torio, como se observa en la figura 13. Estos autores sugieren que se deben realizar muestreos más densos en el área para determinar la procedencia de esta anomalía.

Según Mutis (1983), existen más de treinta y cinco manifestaciones en diferentes áreas del país, que se relacionan en la tabla 8, figura 14.

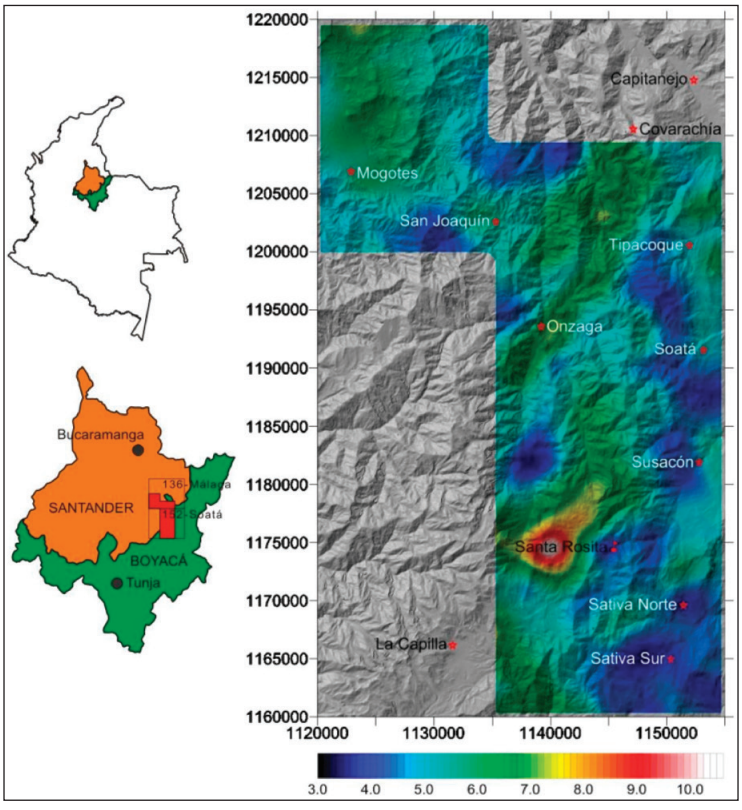


Figura 13. Distribución de uranio y torio en la cuarzomonzonita de Santa Rosita

Fuente: tomado de Moreno, Díaz y Quintero (2011)

Tabla 8. Manifestaciones de uranio en Colombia

Departamento	Ident.	Municipio	Departamento	Ident.	Municipio
Antioquia	1	Fredonia	N. Santander	21	Ábrego
	2	La Unión		22	Arboledas
	3	Montebello		23	Bochalema
	4	San Luis		24	Convención
	5	Urrao		25	Cucutilla
Boyacá	6	Paipa		26	La Playa
	7	Pesca		27	Ocaña
	8	Tuta		28	Pamplonita
Cesar	9	Valledupar		29	Salazar
Cundinamarca	10	Área de Sumapaz		30	Sardinata
	11	Medina	Risaralda	31	Quinchía
	12	Quetame	Santander	32	Contratación
Guajira	13	Villanueva		33	San Vicente de Chucurí
Huila	14	Garzón		34	Zapatoca
	15	Palermo	Tolima	35	Chaparral
	16	Tesalia		36	Natagaima
Magdalena	17	Sierra Nevada de Santa Marta		37	Planadas
Meta	*	El Calvario	Valle	38	Ginebra
	19	Iteviare	Vaupés	39	Mitú
Nariño	20	Barbacoas			

Fuente: Mutis (1983)

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el uranio se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 25 051 registros analizados (figura 14), (SGC, 2016).

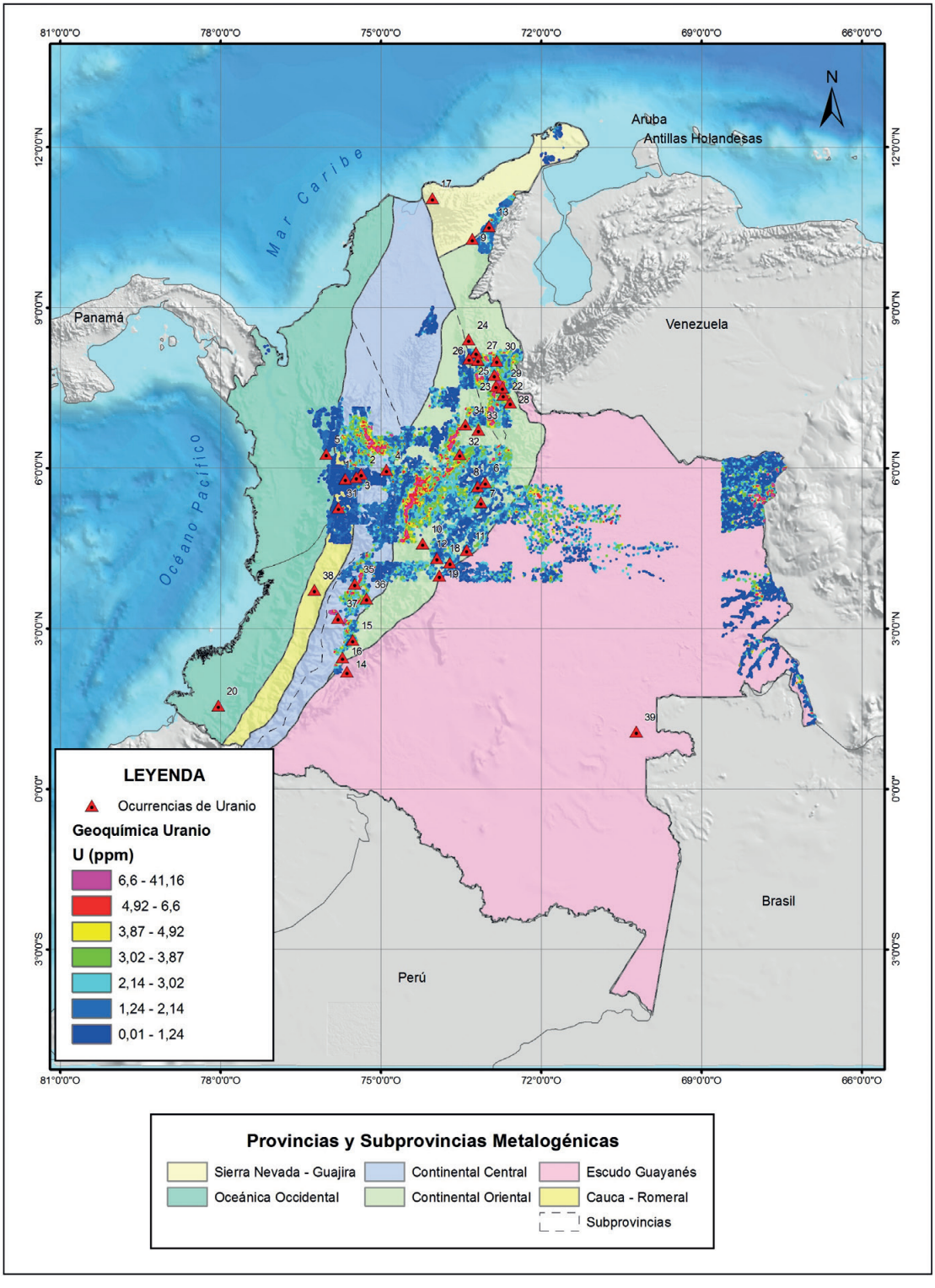


Figura 14. Ocurrencias y distibución geoquímica de uranio en Colombia

Fuente: Mutis (1983, tabla 8), SGC (2016), Salinas *et al.* (1999)

3.3. Situación actual de la minería

A continuación se realiza una breve descripción de la situación actual de la minería de uranio en Colombia.

`3.3.1. Potencial

Si se tiene en cuenta el tipo de depósito de la clasificación BC Mineral Deposit Profiles (Cox y Singer, 2002), se podría sostener que las mineralizaciones presentes en el país corresponden a depósito tipo venas clásicas de U I13; depósitos en areniscas DO5; paleoplacers C04, depósitos en rocas fosfáticas, y depósitos en conglomerados.

Según información de Ingeominas, hasta 1962 solo existían algunos datos aislados sobre el uranio. A partir de la creación del Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), hoy desaparecido, se adelantaron estudios específicos de prospección del uranio que cubrieron sectores importantes del sistema cordillerano y sectores menores del Escudo de la Guayana. Estos estudios coordinados por el IAN fueron en su mayor parte adelantados por varias firmas, como AGIP, Enusa, Total, Minatone, Cogema, Iaeay Coluranio, esta última una empresa estatal creada específicamente para la investigación del uranio.

El resultado de los trabajos de estas diferentes empresas se manifestó en la identificación de varias anomalías localizadas en los departamentos de Santander (Zapatoca, California y Contratación), Norte de Santander (Santa Elena) y Caldas (Berlín).

En 1981, el IAN elaboró un proyecto de evaluación de áreas con base en unas 450 anomalías uraníferas reportadas hasta esa fecha. Este programa no se llevó a cabo.

En la actualidad, según información de Catastro Minero, hay tres títulos vigentes para la exploración de uranio en Colombia.

3.3.2. Comercio

Producción. No se conocen datos de producciones de uranio en Colombia; sin embargo, por la información compilada en el DANE (2007) de algunas exportaciones realizadas a partir de 2003, es posible estimar que se han producido aproximadamente 15 000 kg hasta el 2005, sin que se pueda precisar su origen.

Importaciones. Respecto a las importaciones, en los reportes del DANE (2007) solo aparece información sobre elementos e isótopos y compuestos radiactivos. La figura 15 muestra su comportamiento.

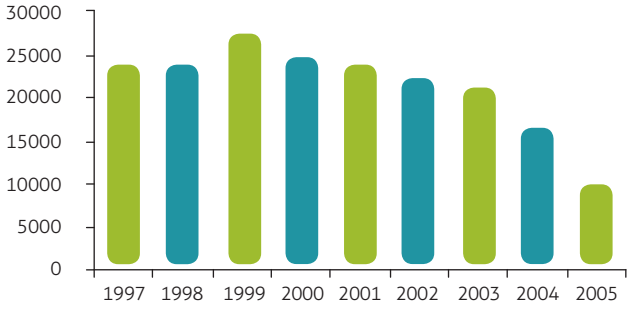


Figura 15. Comportamiento de las importaciones de concentrados y óxido de uranio entre 1995 y 2006 (en toneladas)

Fuente: DANE (2007)

En 2006, el origen fundamental de las importaciones de los elementos e isótopos y compuestos radiactivos fue Estados Unidos (60 %), seguido del Reino Unido (14 %) y Alemania (6 %).

3.3.3. Perspectivas

Actualmente la demanda mundial de uranio experimenta un estancamiento y, según los pronósticos, continuará así por unos años, debido al accidente de la planta nuclear de Fujishima, en Japón, que puso como prioridad el tema del mantenimiento de todas las plantas nucleares, lo que implicó una disminución en el consumo de este mineral. Se prevé que en la próxima década entren en operación más reactores nucleares que posibiliten incrementos en la producción; los precios probablemente mantengan su tendencia alcista.

Teniendo en cuenta que el país cuenta con potenciales existencias de estos depósitos, y dada la importancia del uranio como mineral estratégico, resultará interesante incentivar la realización de proyectos con el propósito de lograr producciones que aseguren la demanda interna y penetrar mercados de la región. En la actualidad ya hay empresas trabajando en exploración en el territorio colombiano. El Estado, a partir de 2008, retomó las actividades exploratorias en el país.

4. Aspectos ambientales y sustitutos

El petróleo está ya descartado como fuente de energía principal para el futuro, y la energía nuclear de fisión basada en el uranio no tiene más de 50 años de vida. Debido a que los países emergentes van aumentando sus necesidades energéticas a un ritmo elevado y el resto de países suman sus propios niveles de consumo se puede prever

que las reservas de este elemento se agotarán en un corto lapso de tiempo, y no se encuentran yacimientos rentables para paliar la creciente demanda. Algunos expertos sostienen que la respuesta se encuentra en el torio. Sin embargo, aunque el torio puede ser el sustituto perfecto del uranio, y es muy posible que pueda ser utilizado en el futuro como combustible nuclear, esa aplicación todavía está en fase de desarrollo, y seguimos dependiendo del uranio (Nayemi, 2015).

El torio (símbolo Th y número atómico 90) es un elemento químico de la serie de los actínidos que se encuentra en estado natural en los minerales monacita, torita y torianita. Sus principales aplicaciones recurren a aleaciones con magnesio, y es utilizado en motores de avión. Existe más energía encerrada en núcleos de los átomos del torio existente en la corteza terrestre que en todo el petróleo, carbón y uranio de la Tierra.

En estado puro, es un metal blanco-plata que se oxida con mucha lentitud. Si se reduce a un polvo muy fino y se calienta, arde emitiendo una luz blanca deslumbrante. El torio pertenece a la familia de las substancias radiactivas, lo que significa que su núcleo es inestable y que en un lapso de tiempo más o menos largo se transforma en otro elemento. Cuando un átomo de torio 232 se desintegra, emite una partícula alfa formada por dos protones y dos neutrones. La emisión de la partícula alfa reduce el número atómico del torio 232 en dos unidades, y el número másico en cuatro, así que se transforma en el isótopo 228 de otro elemento: el radio 228. Posteriores desintegraciones forman la cadena natural del torio. Este proceso continúa hasta que se transforma finalmente en un elemento no radiactivo, y por tanto estable, que es el plomo. Gracias al periodo tan grande de desintegración del torio 232, continuará produciendo elementos de su serie durante miles de millones de años.

A continuación discriminamos algunas de las ventajas que ofrecería el torio como sustituto del uranio-235:

- Las reservas de torio triplican las del uranio, a lo cual hay que agregar que el torio se encuentra repartido por todo el mundo.
- Se estima que el 100 % del torio es aprovechable para causas nucleares, mientras que solamente se utiliza el 0.7 % del uranio para el mismo fin. Esto hace que el torio sea más rentable.
- El torio ofrece más garantías de seguridad, por cuanto se descartan los estallidos que históricamente se han producido con el uranio.
- Los residuos radiactivos de este elemento tienen menos impacto en el medio ambiente y son más fáciles de limpiar.
- El mantenimiento de centrales que funcionen a base de torio serían menos costosas que las actuales centrales basadas en el uranio.
- El combustible de torio presenta mejores propiedades térmicas y físicas, así como un mejor rendimiento de la irradiación que el combustible de uranio.
- El punto de fusión del dióxido de torio es unos 500 grados centígrados más alto que el del dióxido de uranio. Esta diferencia ofrece un margen de seguridad en caso de sobrevoltaje o pérdida de refrigerante en un reactor.
- Las técnicas para la disposición a largo plazo de los desechos del ciclo de combustible del torio (que producen una menor cantidad de combustible gastado de alto nivel) pueden ser menos exigentes que las del ciclo de combustión del uranio-plutonio, tanto desde el punto de vista de la vida del repositorio como de las necesidades de espacio.

En cuanto a la parte ambiental, se sabe de los efectos nocivos que para la salud (enfermedades degenerativas, cáncer) tiene el mal uso del uranio en la industria nuclear, debido a las grandes catástrofes que ha ocasionado, como los casos de Chernóbil y, más recientemente, de Fujishima, lo que hace que en el futuro se busquen alternativas de energía limpia (olas del mar, eólica, solar).

Bibliografía

Álvarez, M. (2005). *Yacimientos y obtención de uranio*. Oviedo: Universidad de Oviedo.

Angulo, R. (1978). Uranio. En *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Department of the Prime Minister and Cabinet. (2006). *Processing and Nuclear Energy- Oportunities for Australia?* Report to the Primer Minister by the Uranium Mining. Barton: Deptartment of the Prime Minister and Cabinet.

Ávila, A. (2010). *Exploración de uranio en el sector occidental del macizo de Santander*. Bogotá: Ingeominas.

Berry, L. y Mason, B. (1959). *Mineralogy: Concepts, descriptions, determinations*. San Francisco: Freeman and Company.

Bolívar, S. (1980). *An overview of the National Uranium Resource Evaluation Hidrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance Program*. Colorado: USDO.

Brown, T., Raycraft, E., Deady, E. y Hobbs, S. (2017). *World mineral production: 2011-2015*. Disponible en http://www.bgs.ac.uk.

Calderón, G. (2006). *Seminario sobre tecnologías para el nuevo futuro de la energía nuclear*. Disponible en http://www.fundacionenergia.es/pdfs/seminario%20nuclear%2006/ggc-semnucupm-24-10-06.pdf.

Cortés, A. y Pfeiffer, J. (s. f.). *Clasificación genética preliminar de las manifestaciones uraníferas en Colombia*. II Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.

Cox, D. y Singer, D. (2002). *Mineral deposit models*. USGS.

DANE (2007). *Estadísticas sobre importaciones y exportaciones de minerales*. Bogotá.

De Voto, R. (1978). *Uranium Geology and Exploration*. Colorado: Colorado School of Mines.

Educaplus. (2016). *Elementos químicos*. Disponible en http://www.educaplus.org/sp2002/index.html. Visto el día 02 de septiembre de 2017.

González, L., Gómez, H., Muñoz, R. y Vargas, S. (2010). *Exploración de uranio en Moniquirá, Boyacá*. Bogotá: Ingeominas.

Griem, S. (2016). *Geoquímica en la prospección*. Disponible en https://www.geovirtual2.cl/explorac/text/0300-geoquimica-exploracion.htm.

Hurlbut, C. y Klein, C. (1984). *Manual de mineralogía*. Madrid: Editorial Reverté.

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

McMillan, R. H. (1996). Classical U veins. En *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, Volume 2. British Columbia Ministry of Employment and Investment

Misra, K. (2000). *Understanding mineral deposits*. London: Springer.

Moreno, G., Díaz, J. y Quintero, F. (2011). *Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector central del macizo de Santander, Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Mutis, J. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Nayemi (2015). *Torio: sustituto para el uranio como combustible nuclear*. Disponible en http://100ciasnaturales.blogspot.com.co/2011/01/torio-sustituto-para-el-uranio-como.html.

OECD. (2016). *Uranium 2016: resources, production and demand*. Disponible en https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2016_uranium-2016-en#page117.

Ortega, C. (1983). *Ambientes geológicos uraníferos en Colombia*. Cuarto Congreso Colombiano de Geología. Cali.

Oviedo, L., Vásquez, L., Muñoz, R., Gómez, H., Parrado, G. y Vargas, S. (2008). *Exploración de recursos energéticos: exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca y Chivatá (Boyacá)*. Bogotá: Ingeominas.

Pacheco, A. (1983). *Posibilidades de explotación de los prospectos de uranio, cobre, vanadio de Caño Negro, Quetame (Cundinamarca) y Zapatoca Contratación (Santander)*. Pamer Consultores Ltda.

Paone, J. (1960). Thorium. Mineral Facts and Problems. *Bureau of Mines Bulletin*, (585), 863-872.

Premoli, C. y Lozano, H. (1984). *Some aspect of geology and metallogenesis of uraniferous occurrences in Colombia: regional context and correlations*. Viena: International Atomic Energy Agency.

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

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Atlas Geoquímico de Colombia*. Versión 2016. Concentración de uranio (U). Bogotá.

Tamayo, J., Moreno, G. y Bautista, S. (2013). *Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gamaespectrométricas para potasio, uranio y torio en el sector sur del macizo de Quetame, 2013*. Bogotá: Servicio Geologico Colombiano.

UN (2001). *Classification for reserves/resources – solid fuels and mineral commodities of 1997*. Nueva York: International Frame work, United Nations.

Voto, R. de (1978). *Uranium geology and exploration*. Colorado: Colorado School of Mines.

3. MINERALES DE INTERÉS

Arsénico

René F. Lugo Primelles / Rodolfo Gilart González

Asbesto

Humberto González

Barita

Francisco J. Zambrano Ortiz

Granate

Rodolfo Gilart González / René F. Lugo Primelles



161. Arsénico



179. Asbesto



193. Barita



213. Granate



Oropimente y Rejalgar
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Arsénico

René F. Lugo Primelles y Rodolfo Gilart González

Citación: Lugo, R. y Gilart, R. (2019). Arsénico. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El arsénico ha sido uno de los elementos más mencionados desde la Edad Media hasta la moderna, aunque previamente fue conocido por chinos, romanos y griegos, y aun antes, por los babilonios. Así, en la biblioteca de ladrillos cuneiformes del palacio de Asurbanipal, en Nínive (668 a. C.), se describe prácticamente el sulfuro de arsénico. Los griegos usaron el actual óxido de arsénico como depilatorio, y no podemos olvidar que 4000 años antes de la era cristiana, el arsénico intervenía en la elaboración de los primeros bronces. Sin embargo, el arsénico se divulgó en las civilizaciones primitivas por medio de compuestos o sustancias que contenían dicho elemento, que por su color (amarillo o dorado) y aspecto (polvillo), según se pensaba, podían favorecer la conversión de los metales en oro, y por lo tanto entró de lleno en el campo de la alquimia como medio para elaborar la píldora de la inmortalidad, la conclusión de la Gran Obra o búsqueda de la piedra filosofal, que supuestamente servía para trasmutar los elementos de partida en oro. Los nombres de los minerales de arsénico, rejalgar y oropimente, son tan viejos como sus usos por las civilizaciones antiguas.

Por muchos años el arsénico fue utilizado fundamentalmente en la industria del vidrio, en forma de As_2O_3, al que llamaban *arsénico blanco*. A mediados del siglo XX, con el desarrollo de los insecticidas, adquirió gran importancia, especialmente en forma de arsénico blanco, utilizado para la fabricación de arseniatos de calcio y plomo. Actualmente este empleo ha perdido relevancia con el desarrollo de los insecticidas orgánicos; sin embargo, se han diversificado sus usos, y por ello aún es un producto importante.

Los depósitos comerciales con minerales de arsénico tienen origen hidrotermal y es posible encontrarlos en yacimientos hipotermales, mesotermales y epitermales. Los principales depósitos productores de arsénico se enmarcan en los siguientes tipos: vetas clásicas de uranio, vetas pentaelementos de Ag-Ni-Co-As± (Bi, U), depósitos subvolcánicos de Cu-Au-Ag (As, Sb), epitermales de alta sulfuración de Au-Ag-Cu, depósitos de oro diseminado hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin) y en fuentes termales subacuáticas de Au-Ag.

Lo anterior permite concluir que en Colombia existe potencialidad de localizar depósitos en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (PLCMG), Provincia Litosférica Oceánica Neoproterozoica Arquía (PLONA), Provincia Litosférica Oceánica Cretácica La Guajira (PLOCG) y Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO), que incluyen las provincias metalogénicas Continental Oriental, Continental Central, Cauca Romeral, Sierra Nevada-Guajira y Oceánica Occidental, asociados principalmente con mineralizaciones de metales preciosos y básicos.

1. Usos

El arsénico y sus compuestos son utilizados en la actualidad como pesticidas, herbicidas, insecticidas y en variadas aleaciones.

Entre los usos de mayor relevancia cabe mencionar el de preservante de la madera (arseniato de cobre cromado), uso que representa, según algunas estimaciones, cerca del 70 % del consumo mundial de este elemento.

Los siguientes son otros usos importantes del arsénico:

- Insecticida (arseniato de plomo), herbicidas (arseniato de sodio) y venenos.
- El arseniuro de galio es un importante material semiconductor empleado en circuitos integrados más rápidos y caros que los de silicio. También se usa en la construcción de diodos láser.
- Aditivo en aleaciones de plomo y latones.
- El disulfuro de arsénico se usa como pigmento y en pirotecnia.
- Decolorante en la fabricación del vidrio (trióxido de arsénico).

Históricamente se ha empleado con fines terapéuticos prácticamente abandonados por la medicina occidental, aunque recientemente se ha renovado el interés por su uso, como demuestra el caso del trióxido de arsénico para el tratamiento de pacientes con leucemia promielocítica aguda.

Atendiendo a sus propiedades nocivas para la salud, se recuerdan los síntomas que presenta el organismo cuando es expuesto al arsénico:

- La exposición ligera puede limpiar lesiones de la piel como el acné.
- Fatiga, malestar y náuseas van acompañadas de aliento a ajo. Se pueden presentar eczemas o dermatitis alérgicas con lesiones en la piel y membranas mucosas, con pérdida del color de la piel (hipopigmentación), pérdida del cabello, manchas blancas en las uñas, conjuntivitis, bronquitis y gingivitis.
- Salivación excesiva, estomatitis, dolor abdominal.
- Neuropatías, hemólisis, anemia, carcinomas.
- La exposición prolongada al arsénico puede acelerar la arteriosclerosis de la arteria carótida.

2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del arsénico, tales como la mineralogía y composición, los tipos de depósitos a nivel mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales; además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio a escala mundial de este mineral.

2.1. Características

A continuación se describen las principales características del arsénico.

2.1.1. Geoquímica

El arsénico es el 52.° elemento en abundancia de la corteza terrestre, con 2 ppm ($5{\cdot}10^{-4}$ %), y es uno de los veintidós elementos químicos conocidos que se componen de un solo núcleo estable. El arsénico adopta la forma tetraédrica en su estructura molecular As_4, donde cada átomo está bordeado por otros tres que comparten sus electrones en enlace covalente. La forma más estable a temperatura ambiente es la metálica $As^{-\alpha}$, de color gris y brillo metálico. El arsénico puede comportarse como metal o como no metal, dependiendo de cómo forme sus agregados, según el balance del uso de la menor energía con la mayor entropía. El arsénico se encuentra en forma nativa y, principalmente, en forma de arseniuros, sulfoarseniuros, en una gran variedad de minerales que contienen oro, cobre, plomo, hierro (arsenopirita), níquel, cobalto y otros metales.

El arsénico es el más común de los elementos traza asociados con la mineralización de oro en la mayoría de los depósitos de este metal hospedados en rocas sedimentarias. Por lo regular está presente en la pirita como sustituto isomórfico, en bordes de crecimiento y también en minerales independientes como arsenopirita, rejalgar, oropimente o arsénico nativo. El contenido de arsénico en la mina Carlin se encuentra en el rango de 400 a 500 ppm, con un valor máximo de 2.5 %. En algunos depósitos de oro hospedados en sedimentos en China se ha enriquecido el arsénico a niveles económicos; tal es el caso de Jinyia (As: 0.44-1.89 %) y de Pingding (As: 3.99-15 %).

Por lo anterior, el arsénico puede ser usado como elemento guía en la exploración de yacimientos de cobre, oro, plata, plomo, zinc, uranio y cobalto, mediante la investigación de suelos, aguas y sedimentos; también bajo condiciones especiales, el contenido de arsénico en plantas representa una herramienta de prospección de gran utilidad.

2.1.2. Mineralogía

Al arsénico se lo encuentra, como ya se ha expresado, tanto nativo como en diferentes compuestos. Por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como manganeso, hierro, cobalto, niquel, plata y estaño. El principal mineral del arsénico es la arsenopirita, FeAsS (figura 1); otros arseniuros metálicos son los minerales lollingita (FeAs2), nicolita (NiAs), cobalto brillante (CoAsS), gersdorfita (NiAsS) y esmaltita (CoAs2).

El mundo antiguo conoció solamente dos compuestos de arsénico: los sulfuros rejalgar, As_2S_2, y oropimente, As_2S_3 (figura 2). El rejalgar es una sustancia clara, liviana y translúcida de color rojo anaranjado fuerte, que ha sido usado como pigmento. El oropimente, también usado como pigmento, es una sustancia clara, liviana y translúcida de color amarillo. La naturaleza tóxica del arsénico nunca fue descubierta por los antiguos.

El rejalgar y el oropimente son productos de alteración secundaria que se encuentran asociados al arsénico metálico nativo. En ellos, el arsénico actúa como metal, pero sus compuestos son principalmente covalentes. El arsénico nativo es raro, aunque se encuentra en algunos sitios del planeta, tales como las montañas Harz y Erzgebirge, en Alemania.

Los arseniatos y tioarseniatos naturales son comunes, y la mayor parte de los sulfuros minerales contienen arsé-

nico. El óxido, arsenolita, As_4O_6, se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico, y también se recupera de los polvos colectados de los conductos durante la extracción de niquel, cobre y estaño, igualmente, se obtiene al calcinar los arseniuros de hierro, cobalto o niquel con aire u oxígeno. El elemento puede obtenerse por calcinación de arsenopirita, loelingita FeAsS o $FeAs_2$ en ausencia de aire o por reducción de As_4O_6 con carbonato, cuando se sublima As_4.



Figura 1. Arsénico

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

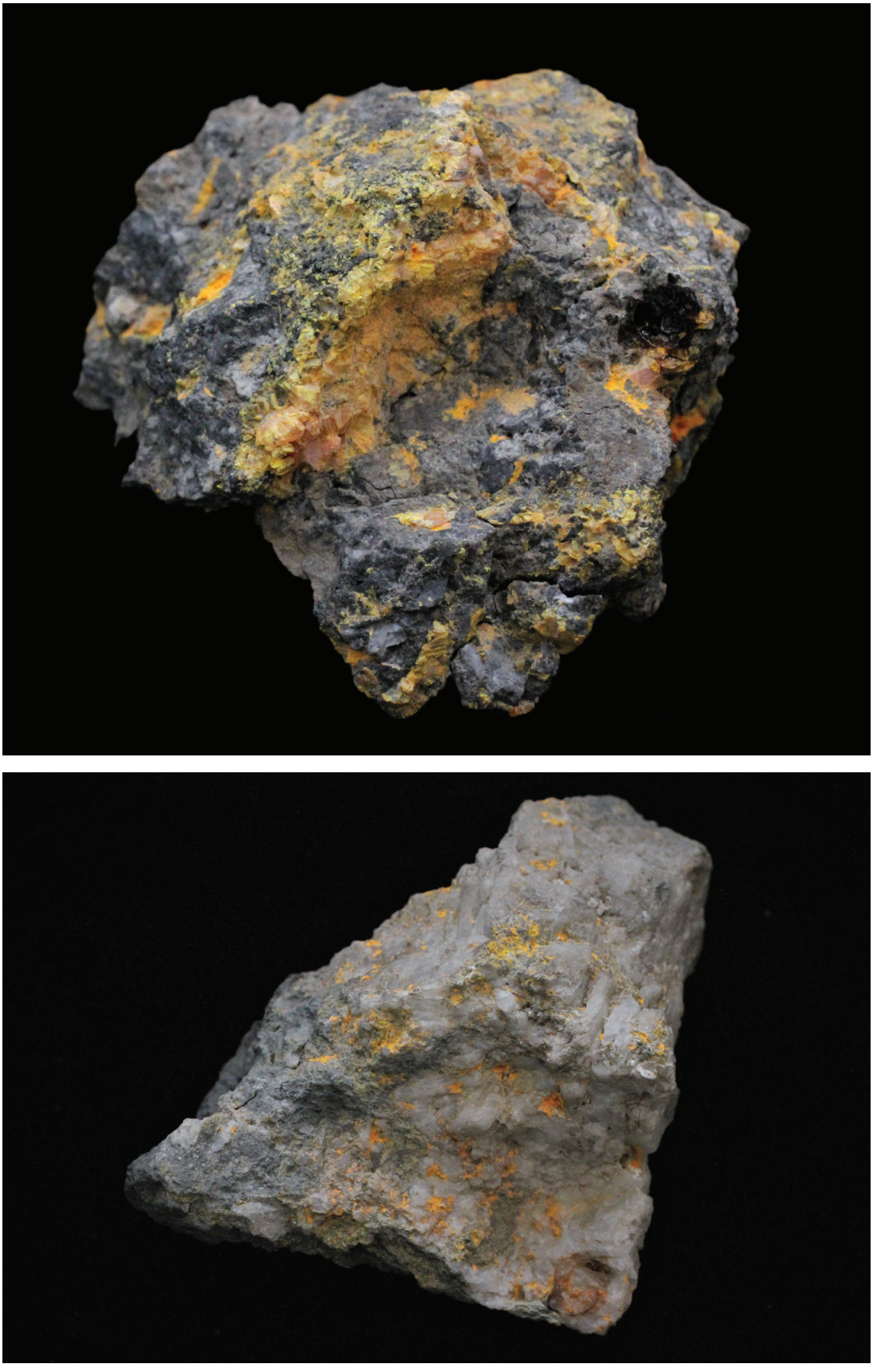


Figura 2. Fotografías de oropimente y rejalgar en cuarzo (arriba), y oropimente- rejalgar (abajo)

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Jair Ramírez, SGC

2.2. Tipo de depósito

El arsénico, nativo o en compuestos minerales, se encuentra asociado a un amplio número de depósitos minerales de variados tipos, donde en su gran mayoría se presenta como un subproducto de otros elementos principales, así como en cantidades no comerciales en algunos depósitos. Constituye concentraciones económicamente explotables en los tipos de depósitos siguientes: vetas clásicas de uranio, vetas pentaelementos de plata- niquel- cobalto- arsénico ± (bismuto, uranio), depósitos subvolcánicos de cobre, oro, plata (arsénico, antimonio), epitermales de alta sulfuración de oro-plata-cobre, depósitos de oro diseminado hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin) y en fuentes termales subacuáticas de oro- plata Au-Ag (BCGS, 2002).

2.2.1. Vetas clásicas de uranio

Son vetas de pechblenda, coffinita o brannerita, con pequeñas cantidades de otros minerales metálicos asociados en una ganga de carbonato y cuarzo. Estos depósitos tienen afinidad con vetas pentaelementos y pueden gradar hacia ellas cuando presentan significativos contenidos de plata, arseniuros de cobalto- niquel, bismuto u otros minerales metálicos. Se desarrollan en ambientes continentales posorogénicos, asociados comúnmente con el plutonismo calcoalcalino félsico y rocas volcánicas. La secuencia encajante común son capas rojas y sedimentos de cuencas extensionales. Los depósitos económicos se ciñen a las áreas sobre basamento proterozoico. La mena se deposita en los espacios abiertos de las zonas de fractura (zonas de dilatación), brechas y estovercas asociadas comúnmente con los sistemas de fallas de ángulo abrupto, de orden principal o secundario, así como en zonas de cizalla. Existen depósitos desde el Proterozoico hasta el Terciario.

Hay una amplia variedad de rocas huéspedes que incluyen rocas graníticas, como granitos peraluminosos de dos micas y sienitas, rocas volcánicas félsicas, rocas sedimentarias antiguas y rocas metamórficas. Algunos depósitos presentan afinidad con diabasas, diques y silos de lamprófidos. Los cuerpos minerales son tabulares o prismáticos, con un espesor de hasta 15 m, y tienen una continuidad, en profundidad, de hasta 2 km.

Las vetas de uranio se encuentran generalmente en áreas de alto Clarke de uranio, y además, por lo general se desarrollan otros tipos de depósitos de Uranio en la vecindad. Las vetas pueden considerarse poligenéticas. El Uranio aparece como derivado de los diferenciados magmáticos finales de granitos y rocas alcalinas con altos contenidos de potasioy sodio. El uranio es separado de las rocas parentales por soluciones acuosas que se pudrían originar bien como hidrotermales de baja temperatura, connatas o por fluidos meteóricos. Las opiniones están divididas sobre la fuente de los fluidos, pero algunos prefieren modelos que incorporan fluidos mixtos. Estudios de isótopos de carbono y oxígeno indican que las soluciones mineralizantes en muchos casos son fluidos hidrotermales que se han mezclado con agua meteórica. En algunos casos la temperatura excede los 400 °C durante el proceso de mineralización. Tipos de depósitos asociados son estratoconfinados, ocurrencias minerales diseminadas y pegmatíticas de uranio en rocas metamórficas, con arsénico no comercial. Otros casos son los depósitos de Uranio encajados en areniscas y depósitos superficiales.

Pertenecen a este tipo de depósitos: ocurrencias minerales Purple Rose, Fisher, Dixie, Cy 4, Mir 3 e IRA, Ace Fay-Verna y Gunnar, área Beaverlodge (Saskatchewan, Canadá); distrito Christopher Island-Kazan-Angikuni, área Baker Lake (Northwestern Territories, Canadá); Millet Brook (Nova Scotia, Canadá); Schwartzwalder (Colorado, EE. UU.); distrito Xiazhuang (China); área La Crouzille, distrito Macizo Central y Vendée, macizo Armoricano (Francia); distritos Jáchymov y Pribram (República Checa); Shinkolobwe (provincia Shaba, Zaire).

2.2.2. Vetas pentaelementos de plata-niquel-cobalto-arsénico ± (bismuto, uranio)

Son vetas carbonatadas con plata nativa asociada a una amplia paragénesis mineral que raramente se encuentra en otros ambientes, tales como arseniuros de níquel- cobalto-hierro, sulfoarseniuros de níquel- cobalto- hierro- antimonio y minerales de bismuto. En muchos casos, solo algunos de estos minerales están presentes, aunque los mejores ejemplos contienen tenores significativos de plata- níquel-cobalto. La uraninita (pechblenda) es un mineral presente en buena cantidad en algunos depósitos. Ocurren virtualmente en áreas sobre la corteza continental, en ambientes postectónicos, en algunos casos en cuencas de subsidencia y elevación (*rifting*) continental. Se considera que las vetas se emplazan a profundidades someras a lo largo de sistemas de fallas de ángulo abrupto.

Las rocas huéspedes más comunes son metasedimentos, rocas intrusivas metamorfizadas y secuencias graníticas. En el campo mineral, los silos de diabasas son muy importantes, en tanto que en Thunder Bay (Canadá) se encuentran en diques de gabro. Los depósitos están conformados por vetas simples o por grupos de vetas, centimétricas a métricas en espesor, en tanto que su continuidad normalmente no excede los 500 m de profundidad.

Comúnmente, cuando se forman rellenan espacios con múltiples episodios de deposición, en los que los sulfuros se distribuyen de forma irregular en cuerpos podiformes, bandas, dendritas, placas y diseminaciones.

Los minerales de la mena son plata nativa, arseniuros de níquel- cobalto (rammelsbergita, safflorita, nicolita, etc.), sulfoarseniuros de cobalto, níquel, hierro y antimonio, bismuto nativo, bismutinita, argentita, pirita, uraninita, y otros menores, como calcopirita, bornita y calcocita. Estas vetas se caracterizan por la ausencia de oro. Calcita y dolomita son los minerales más comunes de ganga, que además incluye cuarzo, jaspe, barita, y fluorita en menor proporción.

Las vetas ocupan fallas con una o dos direcciones preferentes en un distrito dado, donde las bonanzas aparecen en las bandas de dilatación dentro de las vetas. En las zonas de extensión cortical, las fallas controlaron el ascenso de fluidos hidrotermales hasta sitios favorables para la deposición de metales a profundidades aproximadas de 1 a 4 km bajo la superficie. Los fluidos fueron salmueras fuertemente salinas a temperaturas de 150-250 °C, que pueden haberse derivado de los últimos estadios de diferenciación magmática, circulación convectiva de aguas en las rocas encajantes provocada por el enfriamiento de fases intrusivas o la formación de salmueras que migraban hacia arriba o hacia los bordes de las cuencas sedimentarias. Fuentes potenciales de metales son los estratos ricos en sulfuros y *shales* carbonáceos. Tipos de depósitos asociados con estas vetas son vetas clásicas de Uranio y vetas polimetálicas.

Son ejemplos de este tipo de depósitos Beaver y Timiskaming, Cobalt Camp, Silver Islet, distrito Thunder Bay (Ontario, Canadá); Echo Bay y Eldorado (Port Radium, Northwest Territories, Canadá); distrito Black Hawk (New Mexico, EE. UU.); distrito Batopilas (México); Johanngeogenstadt, Freiberg y Jáchymov, distrito Erzgebirge (Alemania); Kongsberg-Modum (Noruega).

2.2.3. Depósitos subvolcánicos de cobre-oro–plata (arsénico, antimonio)

Se desarrollan vetas piríticas, estovercas y brechas en cuerpos intrusivos subvolcánicos, con reemplazamientos discordantes a estratoconfinados de pirita masiva, vetas, estovercas, diseminaciones y brechas hidrotermales relacionadas con las rocas huéspedes. Estos depósitos se localizan cerca o sobre los de tipo porfídico y contienen mineralización aurífera polimetálica pirítica, con sulfosales de plata y otros minerales de arsénico y antimonio. Los cinturones volcano-plutónicos de arcos de islas y márgenes continentales, arcos volcánicos continentales e intrusiones subvolcánicas son los ambientes geotectónicos más abundantes. Los más altos niveles de sistemas intrusivos y las rocas encajantes fracturadas y permeables de terrenos volcánicos con estratovolcanes erosionados, domos y complejos flujo-dómicos son los ambientes de presentación de la mineralización. Se distinguen *stocks* y complejos flujo-dómicos riodacíticos a dacíticos, gruesos a fino granulares, con intrusiones cuarzo-porfídicas. Si las rocas volcánicas son coetáneas, ellas varían desde andesitas hasta riolitas. Son principalmente de edad Terciaria, aunque se han identificado algunos depósitos más antiguos.

La pirita presente es comúnmente aurífera, a la que se asocia calcopirita, tetraedrita-tennantita, enargita-luzonita, covelina, calcocita, bornita, esfalerita, galena, arsenopirita, argentita, sulfosales, oro, estibnita, molibdenta, wolframita o scheelita, pirrotina, marcasita, rejalgar, oropimente, hematita, estaño y minerales de bismuto; que son la paragénesis mineral de estos depósitos. Se distingue una zonación hacia la profundidad: la enargita cerca de la superficie, que pasa gradualmente a tetraedrita-tennantita + calcopirita y a calcopirita en el ambiente porfídico. La ganga está constituida por pirita, cuarzo, sericita, caolinita, alunita, jarosita (supergena). En zonas cercanas a la superficie pueden presentar mantos limoníticos de meteorización con abundante jarosita y goethita, y localmente, alunita.

Estos depósitos representan una transición de los de tipo porfídico hacia las condiciones epitermales con una entremezcla de las características porfídicas y epitermales. La mineralización se relaciona estrechamente con sistemas evolutivos hidrotermales derivados de intrusiones porfiríticas subvolcánicas. Es típica la zonación vertical y la sobreimpresión de tipos diferentes de menas, debido en gran parte al telescopaje de los estadios de mineralización. Los fluidos mineralizantes con cantidades variables de aportes de fluidos magmáticos tienen temperaturas generalmente mayores a las de los sistemas epitermales, en el orden de 300 °C y mayores. Tienen, además, alta salinidad, mayor al 10% en peso equivalente de cloruro de sodio.

La mineralización está controlada por zonas fuertemente fracturadas y ripiadas en las cúpulas y partes internas de intrusiones y complejos flujo-dómicos. Además, por las litologías con permeabilidad primaria o secundaria de las rocas encajantes. Depósitos asociados son los pórfidos de cobre-oro±molibdeno, epitermales de alta y baja sulfuración, vetas cuarzo-piríticas auríferas y sulfuros masivos enargíticos.

Depósitos de este tipo son Equity Silver, Prospecto Thorn, distrito Rochester (Nevada, EE. UU.); Kori Kollo

(Bolivia); las zonas de oro epitermal de Lepanto (Filipinas); partes de Recsk (Hungría) y Bor (Serbia).

2.2.4. Depósitos epitermales de alta sulfuración de oro-plata-cobre

Se presentan vetas, brechas vesiculares y reemplazamientos de sulfuros desde podiformes hasta lentes masivos en secuencias volcánicas asociadas a los niveles altos de sistemas hidrotermales marcados por la lixiviación ácida y las alteraciones argílica avanzada y silícea. Se forman en ambientes extensionales y transtensionales, comúnmente en margen continental volcano-plutónico, arcos oceánicos y zonas de retroarco; en las zonas de emplazamientos magmáticos someros donde están construidos estratovolcanes y otros tipos de edificios volcánicos sobre plutones. Su ambiente de deposición es subvolcánico a volcánico en calderas, complejos flujo-dómicos, raramente *maars* y otras estructuras volcánicas, asociadas frecuentemente con *stocks* volcánicos, diques y brechas. Recubren y están genéticamente relacionados con los sistemas porfídicos en intrusiones mineralizadas más profundas.

Comúnmente son de edad Terciaria a Cuaternaria, menos frecuentes del Mesozoico y raramente de cinturones volcánicos del Paleozoico. La preservación escasa de los depósitos más antiguos refleja una tasa rápida de erosión antes del enterramiento de los volcanes subaéreos en arcos tectónicamente activos. Las rocas encajantes volcánicas lávicas y piroclásticas generalmente van de andesitas hasta riodacitas subaéreas junto con sus equivalentes subvolcánicos. También pueden ser huéspedes de la mineralización los sedimentos permeables entre unidades volcánicas. Vetas, lentes y cuerpos podiformes de sulfuros masivos de reemplazamiento, estovercas y brechas son las morfologías frecuentes. Se observan también formas irregulares, determinadas por la permeabilidad de la roca huésped y la geometría de las estructuras controladoras, así como vetas entrelazadas. En ellos es característica la sílice porosa vesicular (*vuggy*) como producto residual de la lixiviación ácida, drusas, vetas bandeadas, brechas hidrotermales y reemplazamientos masivos de la roca huésped por cuarzo fino granular.

Como paragénesis mineralógica se presentan pirita, enargita-luzonita, calcocita, covelina, bornita, oro, electrum; calcopirita, esfalerita, tetrahedrita-tennantita, galena, marcasita, arsenopirita, sulfosales de plata, telururos incluyendo goldfieldita. Se separan dos tipos de mena: enargita-pirita masiva (mena sulfurosa) y cuarzo-alunita-oro (mena oxidada). La ganga es de pirita y cuarzo, en ocasiones barita. Los carbonatos están ausentes. La mineralogía de alteración es amplia: cuarzo, caolinita/dickita, alunita, barita, hematita, sericita/illita, arcillas y sílice, pirofilita, andalucita, diásporo, corindón, turmalina, zunyita, etc. Las rocas meteorizadas pueden contener abundante limonita (jarosita-goethita-hematita) en una masa de caolinita y cuarzo.

La mineralización está controlada por la estructura anular y fracturas radiales de los edificios volcánicos-calderas, grupos de fracturas en domos resurgentes y complejos flujo-dómicos, tubos de brechas hidrotermales y diatremas, además de fallas y brechas dentro y alrededor de centros intrusivos, y litologías permeables. Los depósitos se encuentran en un amplio rango de profundidad, desde las solfataras de la paleosuperficie hasta las cúpulas de cuerpos intrusivos en profundidad.

Investigaciones recientes, fundamentalmente en el suroeste del Pacífico y los Andes, muestran que estos depósitos se formaron en complejos (volcánicos subaéreos o volcanes compuestos de arcos de islas sobre las zonas de degasificación de las cámaras magmáticas). Es común que ellos estén relacionados genéticamente con intrusiones someras. Son comunes los estadios múltiples de mineralización, relacionados presumiblemente con el tectonismo periódico propio de la actividad intrusiva y la generación del fluido magmático hidrotermal. A estos depósitos se asocian los de tipo porfídico (cobre-molibdeno-oro), subvolcánicos de cobre-plata-oro (arsénico, antimonio), epitermales de baja sulfuración oro-plata, fuentes termales de oro-plata y depósitos de placeres.

Los siguientes son ejemplos de depósitos: Mt. McIntosh/Hushamu, depósitos Taseko River-Westpine, Taylor-Windfall y Battlement Creek (Columbia Británica, Canadá); Goldfield y Paradise Peak (Nevada, EE. UU.); Summitville (Colorado, EE. UU.); Nansatsu (Japón); El Indio (Chile); Temora (Nueva Gales del Sur, Australia); Pueblo Viejo (Rep. Dominicana); Chinkuashih (Taiwan); Rodalquilar (España); Lepanto y Nalesbitan (Filipinas).

2.2.5. Depósitos de oro diseminado hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin)

En la producción mundial, es el tipo de depósito más importante en cuanto al aporte de arsénico. Los principales distritos minerales del mundo se encuentran en los Estados Unidos (estado de Nevada) y en China, en las provincias de Guizhou, Sichuan, Yunnan, Guangxi, Shanxi, entre otras. El principal productor mundial de arsénico es el depósito de Qiaoqiaoshang, de la provincia Sichuán, donde se acumulan los concentrados minerales de rejalgar y oropimente para luego ser procesados en Ghizhou.

Se caracterizan por su granulometría muy fina, el oro en fracción micrométrica y los sulfuros diseminados en las zonas de descarbonatación de las rocas calcáreas y jasperoides asociados. La ocurrencia del oro es a través de las rocas huéspedes en forma de cuerpos concordantes con la estratificación y en brechas discordantes. Pertenecen a ambientes tectónicos de márgenes continentales pasivos con deformación subsecuente y actividad intrusiva y, posiblemente en terrenos de arcos de islas. Las rocas huéspedes de los depósitos de Nevada, EE. UU., se depositaron en ambientes transicionales de *shelf*-cuenca, y se formaron predominantemente turbiditas carbonatadas (más de 150 m espesor), caracterizadas por sedimentación lenta. Existen plutones félsicos del Mesozoico a Terciario cercanos a muchos depósitos. Son del Terciario en general, aunque pueden tener cualquier edad. Las rocas encajantes son comúnmente calizas o dolomitas finamente estratificadas, arenáceas, o arcillosas carbonosas asociadas con *shales* carbonosos. Aunque menos productivas, las rocas siliciclásticas no carbonatadas y raramente metavolcánicas son huéspedes localmente. En algunos depósitos también se presentan mineralizados los plutones félsicos y diques.

La forma de los depósitos es generalmente tabular, cuerpos estratiformes irregulares, que se localizan en los contactos entre litologías contrastantes. Algunas zonas minerales (a menudo de alto tenor) son discordantes, a partir de brechas en zonas de fallas de ángulo abrupto. Los sulfuros (pirita principalmente) y el oro están diseminados en ambos casos. El reemplazamiento de sílice en el carbonato va acompañado de una pérdida de volumen, por lo que es común el brechamiento de las rocas de caja. Generalmente la fina diseminación de sulfuros es menor de 1 %.

La mena está compuesta por oro nativo (micrónico), pirita con bordes de arsénico, arsenopirita, estibnita, rejalgar, oropimente, cinabrio, fluorita, barita, y minerales raros de talio. La ganga es de cuarzo de grano fino, barita, minerales arcillosos, materia carbonácea (vetas de calcita del último estadio). En los depósitos de Nevada se observa una profunda alteración supergénica, conformada principalmente por alunita y caolinita, acompañadas de hematita.

En la actualidad se consideran tres modelos genéticos para este tipo de depósitos:

- Modelo epitermal: ampliamente aceptado, pero todos los depósitos conocidos no encajan en él. Según este modelo, la mineralización es consecuencia del magmatismo somero del Mioceno, relacionado con procesos de extensión de cuencas y sierras. Nuevos descubrimientos de cuerpos profundos, sobreimpuestos a la deformación de cuencas y sierras y el reconocimiento del origen supergénico de la alunita han puesto en duda la exactitud del modelo.
- Modelo de *skarn* distal: muy popular actualmente, ya que muchos depósitos ocurren cerca de intrusiones, *skarns* y rocas calcosilicatadas. El oro es relacionado con el colapso de la estructura de un sistema de intrusión central (sistema hidrotermal de tipo porfídico). Aun cuando es aceptable para muchos depósitos, falla en la explicación de ciertos distritos (p. ej., Jerritt Canyon, EE. UU.; Guizhou, China), donde no se ha observado el magmatismo asociado.
- Modelo de fluido crustal profundo: propuesto de forma reciente para señalar una mezcla profunda inferida de diferentes fluidos provenientes de reservorios diferentes, según el análisis de los datos de isótopos estables ligeros y de inclusiones fluidas. Variantes de este modelo solo implican relaciones indirectas con el magmatismo, sugieren una edad única —Paleógeno para los depósitos de Nevada—, que se relaciona con un solo período de extensión crustal de cuencas, sierras y fallas asociadas, que estuvieron controladas por estructuras paleozoicas y mesozoicas preexistentes.

2.2.5.1. Controles de la mena

Reemplazamiento selectivo de rocas carbonatadas carbonosas adyacentes y a lo largo de fallas de ángulo abrupto, fallas regionales de cabalgamiento o por la estratificación.

Presencia de pequeños plutones félsicos (diques) que pueden haber causado la actividad geotermal e intruido un reservorio somero de hidrocarburos o un área de rocas enriquecidas en hidrocarburos, a raíz de lo cual se habría impuesto un sistema geotermal convectivo sobre el acuífero subterráneo local.

Se asocian a este tipo de depósitos los porfídicos, *skarns* de oro, wolframio y molibdeno, así como mantos polimetálicos.

Ejemplos de estos depósitos son Golden Bear, partes de Brewery Creek (Yukón, Canadá); Carlin, Getchell, Cortez, Gold Acres, Jerritt Canyon, Post and Gold Quarry (Nevada, EE. UU.); Mercur (Utah, EE. UU.); Mesel (Indonesia); distrito de Guizhou (Lannigou, con más de 100 t oro, Getang, Zimudang) China.

2.2.6. Depósitos de fuentes termales subacuáticas de oro-plata

Sulfuros en vetas, reemplazamientos y cuerpos estratificados sedimentarios son depositados en rocas volcánicas y sedimentos asociados con las áreas de aguas lacustres

someras, fluviales o marinas, o en subsuelos glaciares, cuyos ambientes favorables son los arcos volcánicos activos (arcos de islas oceánicas y arcos de margen continental). Se distinguen dos ambientes deposicionales: 1) reservorios rellenos de agua en áreas volcánicas continentales activas (lagos de cráter, lagos de playa, planos de flujos de corrientes, subsuelos glaciares); 2) calderas brechadas al pie del mar o sedimentos marinos someros no consolidados al pie de un volcán. Ocurren presumiblemente a cualquier edad, aunque el ejemplo más antiguo es del Jurásico. La mineralización se hospeda en flujos de lavas y tobas de composición félsica a intermedia con intercalaciones menores de rocas sedimentarias. Lavas almohadilladas, flujos de derrumbe (*debris flows*) epiclásticos gruesos y diques indiferenciados de canales de alimentación subvolcánica forman parte de la secuencia estratigráfica local.

La morfología del depósito es altamente variable: estoverca o red de venillas (*stringers*) hacia el yacente, cuerpos podiformes de sulfuros masivos, amplios y sin textura; capas y lentes de sulfuros, estratiformes, finamente laminados; capas sedimentarias de sulfuros clásticos retrabajados y vetas de brechas de estilo epitermal con amplias vesículas, sulfuro grueso y sílice tipo calcedonia. Todos los tipos pueden coexistir en el mismo depósito. Las texturas varían desde sulfuros clásticos finos y precipitados químicos framboidales hasta agregados de sulfuros de grano muy grueso en vetas de brechas. Los estilos estructurales incluyen vetas estovercas, vetas de brecha principales, lentes y capas de sulfuros estratiformes e irregulares.

La mineralogía de la mena comprende esfalerita, tetrahedrita, boulangerita, bournonita, oro nativo, plata nativa, amalgama, galena, calcopirita, enargita, pirita, estibnita, rejalgar, arsenopirita, oropimente; arsénico metálico, Hg-wurtzita, cinabrio, minerales de plata-plomo-arsénico-azufre, krennerita, coloradoita, marcasita, magnetita, escorodita, jarosita, limonita, anglesita, azufre nativo. La ganga incluye cloruro de magnesio, moscovita (sericita), calcedonia, sílice amorfa, calcita, dolomita, pirobitumen, yeso, barita, feldespato potásico, alunita, grafito, halita y cristobalita. Por su parte, la mineralogía de alteración resulta amplia: roca de clorita masiva (clinocloro)-illita-cuarzo-yeso-barita o de cuarzo-moscovita-pirita, que se asocian con las zonas profundas de estoverca del yacente, donde los minerales de alteración están restringidos a zonas de fracturas. La mineralización estratiforme irregular está acompañada de cloruro de magnesio, moscovita, calcedonia, calcita, dolomita y pirobitumen. En los depósitos de fuentes termales de Osorezan (Japón), la sílice pervasiva y microvenillas de alunita son las fases dominantes de alteración.

El modelo genético propone que los depósitos se formaron por fluidos de fuentes termales que acceden por ventanas estructurales a un ambiente acuoso somero. Los fluidos tienen más carácter magmático que meteórico. Este concepto contrasta con algunas características del modelo de procesos para los sulfuros masivos vulcanogénicos. La zonación lateral y vertical ha sido reconocida en un mismo lente. La zonación lateral muestra cambios desde un grupo de minerales ricos en antimonio-arsénico-mercurio, hasta paragénesis ricas en zinc, plomo y cobre. La zonación vertical se expresa con un sistemático incremento de los tenores de oro, plata y metales básicos hacia arriba en la sección. Los conductos de fluidos son fisuras generadas por el choque sísmico gradual del volcán sobre una cámara magmática expandida tardíamente, o por la fracturación en respuesta a la tectónica compresional regional. Un cuerpo magmático subvolcánico cerca de la superficie es una fuente esencial de metales, fluidos y calor.

Depósitos que se asocian son los de fuentes termales de mercurio, de oro-plata, vetas epitermales y sulfuros masivos volcanogénicos exhalativos. Ejemplos de depósitos de fuentes termales subacuáticas de oro-plata son Eskay Creek, Lulu (Canadá); Osorezan, islas de los Volcanes y campo hidrotermal Jade (Japón); volcán Mendeleev (islas Kuriles, Rusia); Rabaul (Papúa Nueva Guinea); isla White (Nueva Zelanda); Bacon-Manito y Surigao del Norte (Filipinas).

2.3. Métodos de prospección

La prospección debe realizarse 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, que incluyen comprobación de la fotointerpretación y de anomalías geoquímicas y geofísicas antiguas. La inspección preliminar de campo se ejecuta con muestreos de sedimentos activos de corrientes, así como de rocas, y otros trabajos regionales, como pueden ser estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques) y trabajos geofísicos, preferentemente mediante métodos magnéticos y geoeléctricos. Se

deberán obtener las dimensiones y morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales.

Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calcularán recursos inferidos, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados. Teniendo en cuenta que el arsénico se obtiene principalmente como subproducto en depósitos de metales preciosos, básicos y otros, como cobalto y níquel, los elementos guías para la exploración geoquímica varían de uno a otro tipo de depósitos, pero incluyen en general arsénico, antimonio, mercurio, plata, oro, cobre, zinc, plomo, talio, wolframio, selenio, telurio. Se debe establecer una malla espaciada entre las labores de prospección (trincheras, apiques, túneles y perforaciones diamantinas), que puede oscilar entre 200-240 m las distancias entre perfiles de investigación, en tanto que la separación entre labores de muestreo en cada perfil se ejecuta hasta 100-120 m, que son redes propias para investigar los elementos principales.

La exploración general permite la delineación inicial de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreos superficiales de afloramientos, trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos magnéticos y geoeléctricos más detallados, así como también la realización de apiques y algunas perforaciones, que conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delinearán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. Por lo general, al concluir estos trabajos, las distancias entre perfiles de investigación alcanzan 100-120 m, en tanto que la separación entre labores de muestreo en cada perfil se reduce hasta 50-60 m. Se realizarán los estudios metalúrgicos preliminares, de primordial importancia para definir la viabilidad ulterior del proyecto. Se realizarán los estudios de prefactibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para continuar hacia la etapa detallada siguiente. Se calcularán recursos indicados e inferidos y reservas probables.

La exploración detallada permite la delineación tridimensional pormenorizada de los depósitos mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes, tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y beneficio mineral. Ya para esta etapa, las distancias entre perfiles se reducen hasta 50-40 m (uno o dos perfiles intermedios entre los de la exploración general, atendiendo al grado de heterogeneidad de la mineralización) y entre labores en el perfil de hasta 25-20 m. Se realizarán los estudios metalúrgicos necesarios de esta etapa. Se realizarán los estudios de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán recursos medidos, indicados e inferidos y reservas probadas y probables.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se describen los procesos de extracción y procesamiento de los minerales que contienen arsénico.

2.4.1. Sistemas de explotación

Desde el punto de vista de su explotación, se aplican diversos sistemas, atendiendo a diferentes criterios, entre los que se destacan la forma del yacimiento, el relieve del terreno original, su proximidad a la superficie, la complejidad o el número de mineralizaciones, la distribución de la calidad del mineral en el yacimiento y el tipo de roca dominante.

Teniendo en cuenta estos criterios, se distinguen dos grandes grupos de métodos de explotación: de superficie o a cielo abierto y subterráneo. Los de superficie se caracterizan por los grandes volúmenes de materiales que se deben mover; en la minería subterránea, la extracción del estéril suele ser insignificante a lo largo de la vida de la mina, procede de las labores de acceso y preparación de la misma.

Considerando el hecho de que la mayoría de la producción de arsénico procede de minas de oro, plata, cobalto, níquel, uranio y otros, el sistema que se adopta para la explotación responde a la explotación óptima del elemento principal.

2.4.2. Procesamiento de minerales

El proceso de obtención del arsénico se inicia con la extracción de la mena desde el depósito ya sea mediante explotación subterránea o a tajo abierto; una vez arrancado el mineral en la mina, se transporta a la planta de tratamiento, donde es sometido a los siguientes pasos:

Trituración: grandes máquinas reducen las rocas a un tamaño uniforme de no más de ½ centímetro.

Molienda: diferentes molinos continúan reduciendo el material, hasta llegar a una granulometría muy fina.

Dependiendo de la mena con la que se asocie el mineral, así será el proceso de extracción, en primera instancia del mineral principal y posteriormente del arsénico, por algún proceso que permita su recuperación.

Según *Realidad Minera (s.f.)* se encuentra comúnmente en forma de impureza en los minerales metálicos y

que se produce a escala comercial, y en ocasiones alcanza contenidos tan elevados que impiden la explotación del yacimiento. El arsénico también puede ser arrastrado de algunos yacimientos de metales por acción de cianuros o del drenaje ácido de roca, pero es posible atraparlo y eliminarlo de las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente.

Durante la flotación de sulfuros metálicos se utiliza cianuro para deprimir la arsenopirita; esta se concentra en las colas de flotación y termina en los botaderos (desechos de la actividad minera), donde también se intemperiza. Sin embargo, parte del arsénico flota al presentarse en forma de sulfosales con contenidos de plata.

En los concentrados de cobre se imponen penalidades cuando se rebasa 0.1 % de arsénico, y en los de sulfuro de plomo, el 0.5 %. En la pirometalurgia del cobre una parte del arsénico se separa en los polvillos de tostación oxidante parcial, y otra queda soluble en la mata. En la conversión de mata a cobre *blister*, algo de arsénico pasa a la escoria, por lo que es necesaria una pirorrefinación del cobre *blister* y, aún así, el arsénico llega hasta el proceso de electrorrefinación, y aquí se separa por precipitación química.

En el caso del concentrado de plomo, una parte del arsénico se elimina durante la tostación oxidante total (sinterización) y, al reducirse el óxido de plomo, otra parte se concentra en las fases de plomo, mata y speise. Durante la pirorrefinación, el arsénico se separa del plomo en forma de arseniato de sodio, por oxidación con aire o aire enriquecido con oxígeno e hidróxido de sodio. Las fases de mata y *speise* se mandan a la planta de refinación de cobre, donde el arsénico se recupera como As_2O_3.

En la metalurgia del zinc, el arsénico se separa del mineral en gran parte durante la tostación oxidante total, pero pequeñas cantidades de arsénico oxidado pasan a solución durante la lixiviación neutra, y allí se le adiciona polvo de zinc para eliminarlo como arsina AsH_3 (gas muy tóxico).

Para eliminar iones férricos, la solución ácida caliente se neutraliza con producto de tostación que contiene arsénico; este último formará parte de los botaderos de jarosita. Todos los residuos de arsénico, confinados en presas de colas de flotación o lixiviación, son intemperizados formando óxidos que son solubles en medio ácido. Por ello, es necesario encontrar alternativas para formar compuestos de baja reactividad que puedan ser confinados de manera segura.

Según USGS (2017), en la fusión de minerales de cobre, plomo, cobalto y oro se obtiene trióxido de arsénico que se volatiliza en el proceso y es arrastrado por los gases de la chimenea, que pueden llegar a contener más de un 30 % de trióxido de arsénico. Los gases de la chimenea se refinan posteriormente mezclándolos con pequeñas cantidades de galena o pirita para evitar la formación de arsénico, y por tostación se obtiene trióxido de arsénico entre el 90 y 95 % de pureza, que, mediante sublimaciones sucesivas, puede incluso llegar al 99 %.

Reduciendo el trióxido de arsénico con carbón se obtiene el metaloide; sin embargo, la mayoría del arsénico se comercializa como óxido. Prácticamente la totalidad de la producción mundial de arsénico metálico es de China, que es también el mayor productor mundial de trióxido de arsénico.

2.5. Recursos, reservas y comercio

No se reportan estadísticas en relación con las reservas mundiales de arsénico, al parecer debido a que su producción mayoritaria resulta como subproducto de la minería y metalurgia de otros elementos metálicos principales en las menas que se explotan en los diferentes países. A ello se añade que sus usos principales se han visto reducidos por su influencia negativa sobre la salud humana, hecho que ha incidido directa y poderosamente sobre la producción y comercialización del citado elemento.

Se considera que las reservas mundiales de arsénico están directamente relacionadas con la producción anual del metal, en el orden de 20 a 30 veces el valor de dicha producción (USGS, 2017). las minas de cobre y plomo contienen aproximadamente 11 millones de toneladas de arsénico, especialmente en Perú y Filipinas, y el metaloide se encuentra asociado a depósitos de cobre-oro en Chile y de oro en Canadá. En China, el mayor productor lo extrae fundamentalmente de las menas auríferas, y menos de menas polimetálicas de plomo- zinc.

La producción mundial de arsénico en el periodo 1996-2016 se muestra en la tabla 1, donde se observa el decrecimiento de la producción debido a sus efectos nocivos sobre la salud humana. China domina la producción mundial con 25 000 t al año, lo que representa un 69 % del global de los países productores, seguida por Marruecos, con un 19 %. En la figura 3 se observa la distribución de la producción durante el año 2016.

Tabla 1. Producción minera estimada de trióxido de arsénico en los principales países

País	1996	2001	2006	2011	2016
Bélgica	2000	1500	1000	1000	1000
Bolivia					50
Chile	6500	8000	11 500	11 500	
China	13 000	16 000	30 000	25 000	25 000
Francia	4000	1000	1000		
Kazajistán	1500	2000	1500		
Japón					45
México	4500	2600	1300		
Marruecos			6900	8000	7000
Namibia	2300				1900
Filipinas	2000				
Perú			3500	4500	
Rusia	1500	1500	1500	1500	1500
Otros	3000	2000	1000	300	
Total	40 300	34 600	59 200	51 800	36 495

Datos en toneladas

Fuente: USGS (2017)

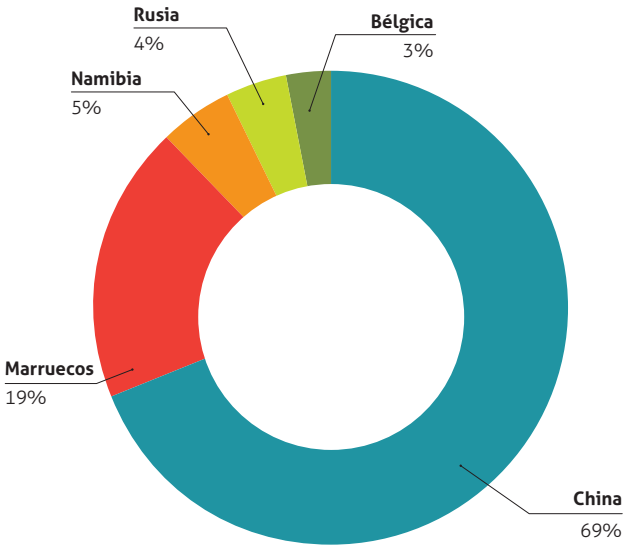


Figura 3. Distribución mundial de producción de arsénico en 2016

Fuente: USGS (2017)

En la figura 4 se observa la distribución de los principales países productores de arsénico a escala mundial. China es el principal productor, con 25 000 t, seguida de Marruecos, con 7000 t, Namibia, con 1900 t, y Rusia, con 1500 t (USGS, 2017).

El precio del trióxido arsénico en el año 2015, según el USGS (2015), fue de USD 0.29 por libra, mientras que el metal de arsénico estaba alrededor de los USD 0.84 por libra.

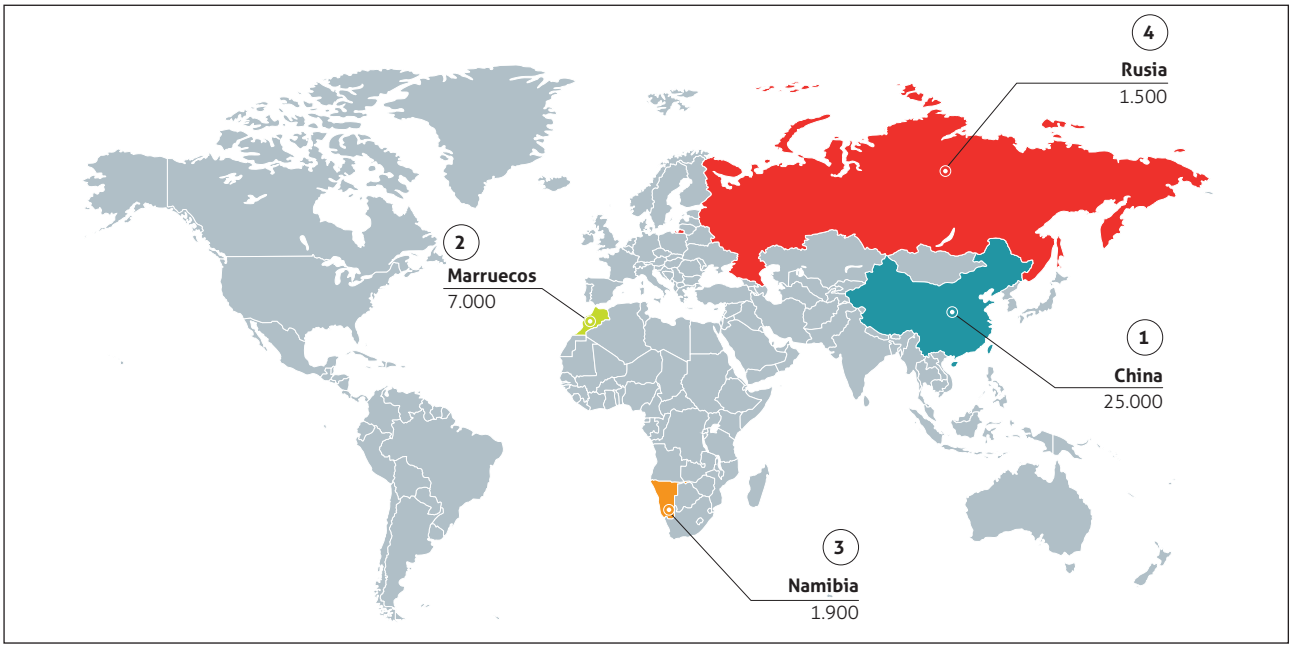


Figura 4. Producción mundial por países en el total de la producción mundial de trióxido de arsénico en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

2.6. Perspectivas

El uso de preservantes alternativos para la madera o alternativas de sustitución de este material, tales como el concreto, plásticos o compuestos a base de madera, continuará aumentando debido a preocupaciones ambientales y de la salud por el uso del arseniato de cobre cromado (ACC) como preservativo de esta. La decisión voluntaria de la industria preservativa de madera de eliminar el arseniato de cobre cromado para algunos productos específicos, a finales de 2003, ha conducido a la declinación de la demanda en los Estados Unidos, y ha afectado la producción de trióxido de arsénico en China. La madera tratada con arsénico, sin embargo, continuará siendo utilizada en usos industriales específicos, por ejemplo, la madera de construcciones marinas, la madera contrachapada utilizada en techos y la usada en postes de uso general.

El arsénico de alta pureza continuará siendo utilizado por la industria de la electrónica en semiconductores de arseniuro de galio, usados en la industria automotriz, en aplicaciones militares y del espacio, así como como en las células solares y en telecomunicaciones.

Las actuales fuentes mundiales de arsénico, sea en la modalidad de trióxido o de metal, disponibles en los depósitos de metales no ferrosos y preciosos que se procesan en catorce países, son suficientes para cubrir las necesidades proyectadas.

3. Arsénico en Colombia

Aun cuando en Colombia se han encontrado algunas manifestaciones de arsénico, hasta el momento no han tenido mayor importancia comercial; sin embargo, su presencia confirma la existencia de ambientes favorables tanto para depósitos primarios como secundarios.

3.1. Geología regional

En Colombia existen unidades litológicas con ambientes de depósito similares a los descritos de otras partes del mundo, en las provincias litosféricas Continental Mezoproterozoica Grenvilliana (PLCMG) y Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA) (Gómez et., al, 2006), en las áreas donde se localizan los depósitos filonianos o polimetalicos, así como también en estas provincias litosféricas oceánicas: Neoproterozoica Arquía (PLONA), Cretácica La Guajira (PLOCG), en la Sierra Nevada de Santa Marta y la península de la Guajira, y Cretácica Occidental (PLOCO), en minerales metálicos (hierro, cobre, plomo, zinc, molibdeno, wolframio, oro y plata). Es decir, hay arsénico en concentraciones industriales en las seis provincias metalogénicas en que está dividido el país: Escudo Guayanés, Sierra Nevada-Guajira, Continental Oriental, Continental Central, Cauca-Romeral y Oceánica Occidental.

3.2. Geología local

Aun cuando en la actualidad en Colombia no se conoce la existencia de minas donde se explote formalmente el arsénico, se sabe de su presencia en la mayoría de explotaciones de filones de oro y plata, y en los depósitos polimetálicos. En muchos de estos es atacado metalúrgicamente por sus procesos, que afectan la calidad de los metales principales que se busca recuperar, como el oro.

Como se mencionó, el arsénico puede encontrarse en todas las provincias metalogénicas en que está distribuido el territorio colombiano. Según Prieto (2005), en el trabajo de muestreo de ultrabaja densidad se encuentra asociado a las zonas de producción de minerales tipo filonianos y de depósitos polimetálicos (figura 5).

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016*, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el Arsénico se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 21 101 muestras analizadas (SGC, 2016) (figura 6).

3.3. Situación actual de la minería

No se conocen explotaciones colombianas asociadas exclusivamente al arsénico. En cuanto a las solicitudes y títulos mineros se refiere, no hay asociado ninguno de manera específica a este tipo de mineral.

3.3.1. Potencial

En Colombia hay un buen potencial para la exploración de arsénico en los depósitos polimetálicos y los filonianos de oro y plata, pero no se les ha reconocido importancia, debido a que en muchos procesos de beneficio, este mineral es atacado por generar mermas en la ley final de los productos principales.

3.3.2. Comercio

En la actualidad no hay datos de importación y exportación de arsénico.

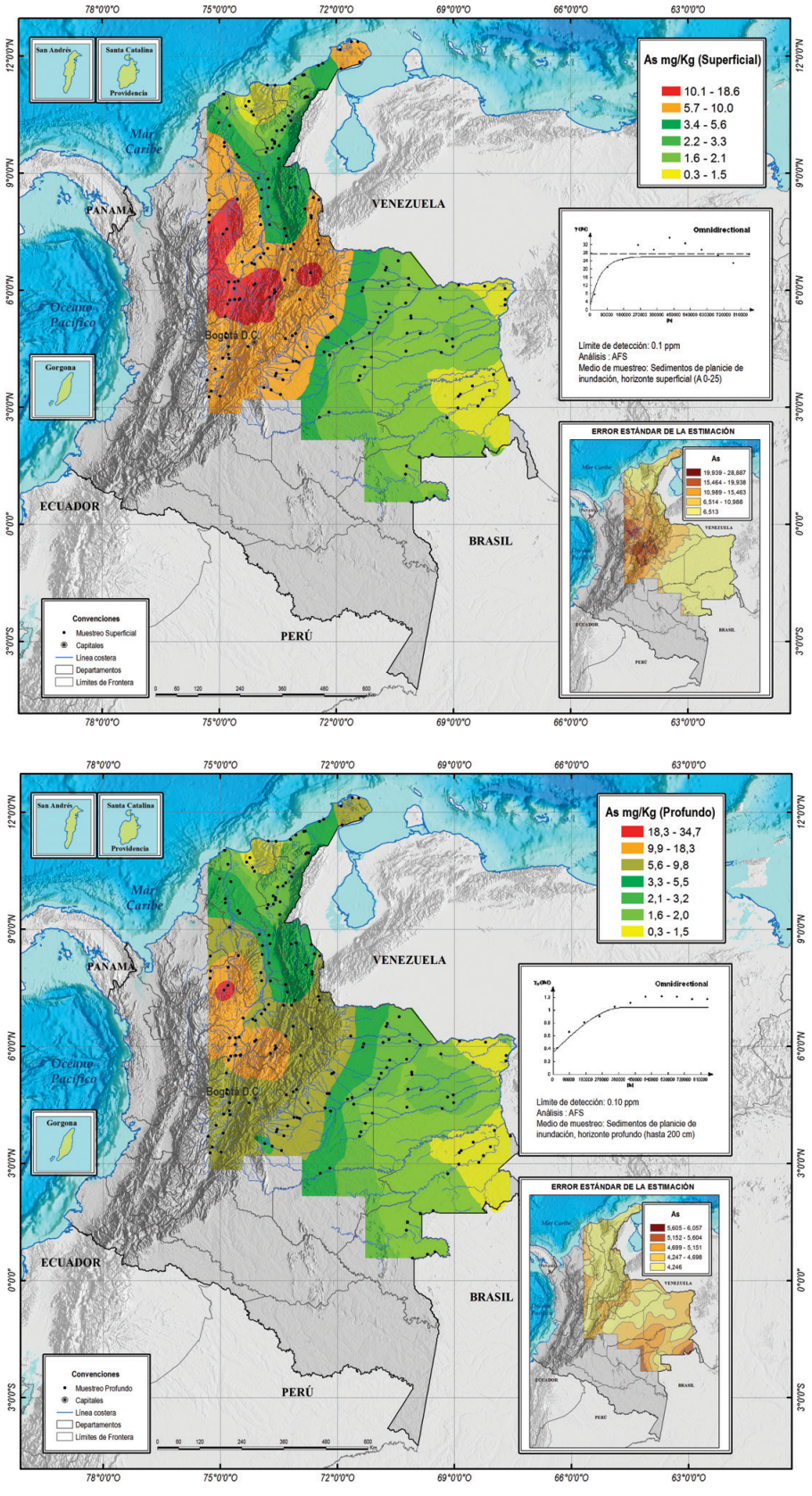


Figura 5. Distribución de arsénico en el muestreo de ultrabaja densidad

Fuente: Prieto, *et al.* (2005)

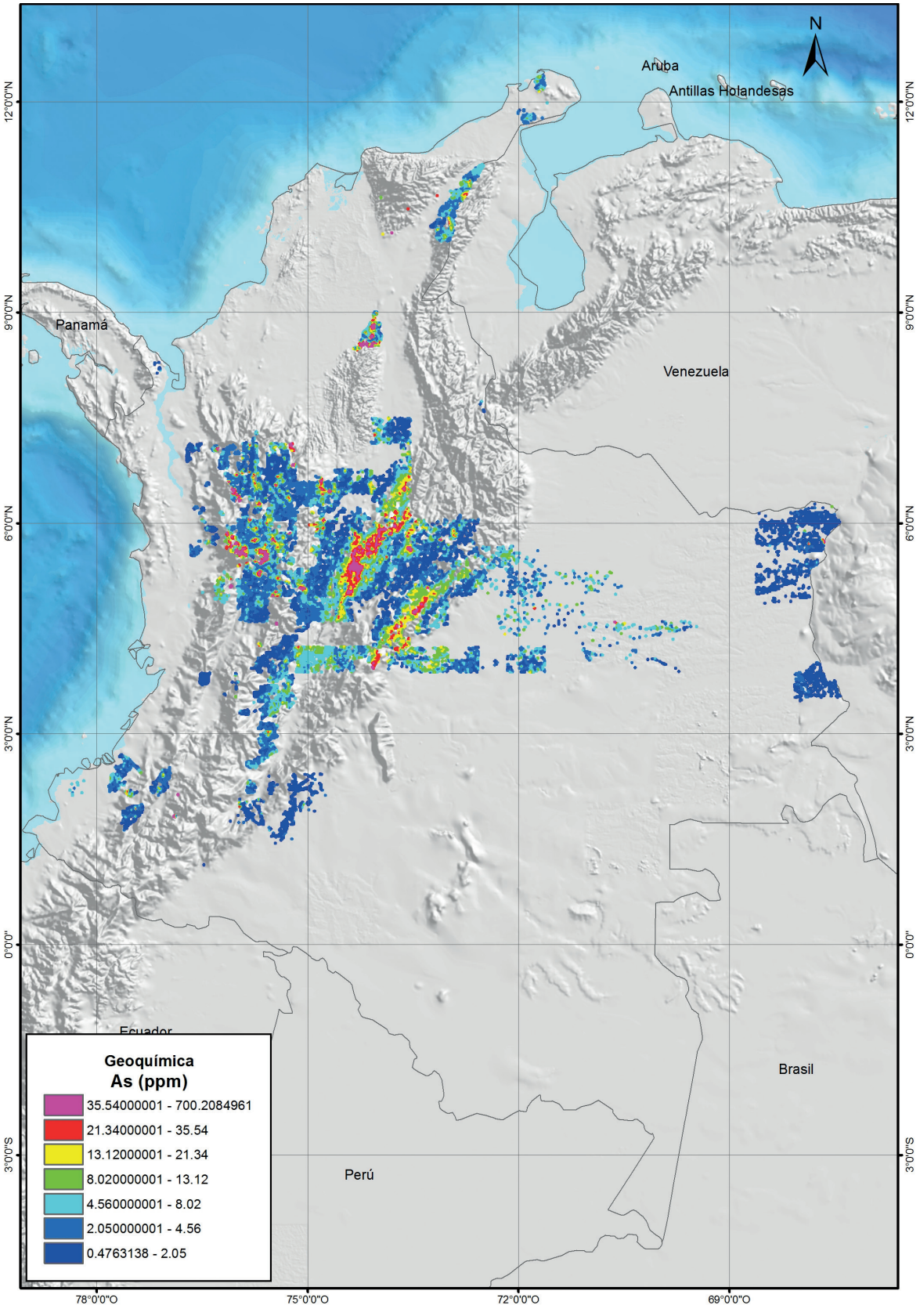


Figura 6. Concentración de Arsénico en Colombia

Fuente: SGC (2016)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

En la industria se puede sustituir el arsénico en las siguientes aplicaciones: en la fabricación de vidrio y aleaciones se puede sustituir con níquel, manganeso, wolframio o zinc; en artículos electrodomésticos se puede reemplazar con silicio, germanio, aluminio, cobre o plomo; en el sector de los herbicidas e insecticidas se puede cambiar por boro, bromo y selenio, y finalmente, en el sector de preservantes de madera se puede suplir con carbón (creosota o brea de alquitrán) y cobre (arseniato de cobre cromatado).

En cuanto a los riesgos para la salud, cuando una persona llega inhalar arsénico, la cantidad que el sistema sanguíneo absorbe depende de dos factores: su solubilidad y el tamaño de las partículas en el aire que lo contengan. Buena parte del arsénico que aparece en el cuerpo proviene más bien de alimentos. En la mayoría de los casos, los compuestos de arsénico son transformados y eliminados rápidamente a través de la orina (Peña, 2017).

Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), el arsénico puede representar los siguientes riesgos para la salud:

- La inhalación de altos niveles de arsénico inorgánico puede producir dolor de garganta e irritación en los pulmones.
- Su ingestión en niveles altos puede causar la muerte. La exposición a niveles bajos produce náusea, vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, fragilidad capilar y sensación de hormigueo en manos y pies.
- La ingestión o inhalación prolongada de niveles bajos de arsénico inorgánico produce oscurecimiento de la piel y aparición de callos o verrugas en las palmas de las manos, plantas de los pies y el torso.
- En contacto con la piel, el arsénico inorgánico puede producir enrojecimiento e hinchazón.

5. Bibliografía

BCGS. (2002). *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles.* Victoria: British Columbia Geological Survey.

Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al*. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000.* Bogotá: Ingeominas.

Peña, M. (2017). *Riesgos en la salud por exposición al arsénico*. Disponible en http://www.salud180.com/salud-z/riesgos-en-la-salud-por-exposicion-al-arsenico

Prieto, G. (2005). *Atlas Geoquímico de Colombia - Mapeo de UltraBaja Densidad.* Bogotá: Ingeominas.

Realidad Minera. (s.f). *¿Qué papel juega elarsénico enla industriaminera?* Disponible en https://www.miningfacts.org/Ambiente/Que-papel-juega-el-arsenico-en-la-industria-minera/

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Atlas Geoquímico de Colombia. Versión 2016.* Bogotá.

USGS. (2015). *Minerals Yearbook- Arsenic Advance release*. Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/myb1-2015-arsen.pdf

USGS. (2017). *Mineral Commodity Summaries 2017. Arsenic.* Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/mcs-2017-arsen.pdf



Asbesto con talco
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Asbesto

Humberto González

Citación: González, H. (2019). Asbesto. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Los asbestos son silicatos de hierro, sodio, magnesio y calcio, con estructura cristalina, que se caracterizan por ser fibrosos, y forman parte del grupo de los anfíboles o de la serpentinita. Presentan una densidad relativa de aproximadamente 2.5 y un punto de fusión superior a 1000 °C.

El asbesto se clasifica en seis variedades mineralógicas: crisotilo (variedad de serpentina), crocidolita (variedad del anfíbol riebeckita), amosita (variedad del anfíbol grunerita), y los asbestos de los anfíboles antofilita, tremolita y actinolita, que no tienen nombres específicos.

El nombre *asbesto* proviene del latín *asbestos* y este del griego *ἄσβεστος* que significa ¨incombustible, inextinguible¨. Entre las características físicas y químicas que reúne el asbesto se encuentran las siguientes: no combustible, resistencia al calor, estabilidad química, resistencia a la putrefacción y corrosión, baja conductividad eléctrica, alta elasticidad y resistencia a la tracción, capacidad específica de absorción y aislamiento.

Los tres tipos de asbesto que tradicionalmente han sido explotados comercialmente son la amosita (gris-marrón) y la crocidolita (azul), del grupo de los anfíboles, y el crisotilo (blanco), del grupo de la serpentina. Actualmente el uso industrial del asbesto se ha visto restringido, y se utiliza casi exclusivamente el crisotilo.

El crisotilo se conoce desde hace más de dos mil años. Inicialmente fue utilizado en tejidos destinados a la cremación, los pabilos de las lámparas de aceite y otros textiles. Pero fue solo en el siglo XIX que el crisotilo comenzó a extraerse en forma comercial en los Urales (Rusia), Italia y Canadá.

En 1984 se fundó el Instituto del Crisotilo (IA), organismo privado constituido por las empresas canadienses productoras de asbesto crisotilo, los sindicatos y el gobierno, preocupados por la situación mundial a la que se estaba enfrentando el crisotilo, en vista de que se estaba prohibiendo su uso y se buscaban sustitutos en varios países. Este Instituto se ha dedicado a promover la utilización segura del asbesto, en la variedad crisotilo, tanto en Canadá como en el resto del mundo, para lo cual ha creado un espacio de investigación, capacitación y discusión en torno a este mineral.

Desde finales de la década de los ochenta, la empresa Minera Las Brisas, ubicada en el municipio de Campamento, Antioquia, ha explotado crisotilo de los tipos 4 y 6, asociado al complejo ultramáfico de Campamento, sobre la cordillera Central. En Colombia, la zona más propensa a ser explorada en búsqueda de asbesto es la franja serpentinizada asociada con el sistema de fallas de Romeral, entre las cordilleras Central y Occidental.

1. Usos

Actualmente solo se fabrican y venden productos de asbesto de alta densidad, entre los que se encuentran los de la variedad crisotilo del grupo de la serpentina. En estos, las fibras crisotílicas están encapsuladas en una matriz de cemento o de resina que impide que se desprendan.

En 1988, un grupo de expertos convocados por el Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS) recomendó prohibir el uso de asbesto en la fabricación de materiales de aislación friables, de baja densidad, y que pueden desmenuzarse con la presión de la mano, dado el riesgo que presenta para la salud de quienes los manejan.

El crisotilo es una fibra mineral que no se quema ni se pudre, resiste a la mayoría de los productos químicos, es flexible y tiene una gran resistencia a la tracción, por lo cual es considerado un componente esencial en productos livianos de cemento reforzado, materiales de fricción, sellos y guarniciones para altas temperaturas, entre otros.

Anteriormente se utilizaban tanto fibras de amosita y crocidolita, como de crisotilo. Se encontró que las fibras provenientes de los anfíboles no salen fácilmente de los pulmones, mientras que las fibras de crisotilo producen menos polvo y pueden ser eliminadas más fácilmente del cuerpo humano (Chrysotile Institute, 2015).

Las fibras de asbesto se clasifican, según su longitud, de mayor a menor, en fibras naturales o crudas (grupos 1 y 2) y fibras procesadas (grupos 3, 4, 5, 6 y 7). La longitud de estas fibras determina la aplicación industrial del asbesto y su valor. Las fibras crudas son seleccionadas manualmente y procesadas para producir hilos largos para uso en textiles y en la industria eléctrica. La fibra para este uso debe tener buena flexibilidad y poco contenido de sales solubles y de magnetita; debe ser suave, fácil de peinar, sin mayor pérdida de tamaños cortos; debe estar libre de madera y de productos como residuos de explosivos. Este tipo de fibra también puede ser usado como fieltro en láminas formadas con resinas, de uso en aviones y embarcaciones (González, 1995).

Las fibras procesadas pasan por métodos mecánicos de separación. Las del grupo 3 son más largas que las del grupo 7. Estas fibras no son hilables y son empleadas en la industria del papel, tuberías, placas, láminas, tejas, envolturas, paneles eléctricos y bandas para frenos, entre otros usos.

El principal uso del asbesto se da en la industria de la construcción: más del 90 % del crisotilo que se usa hoy en día en el mundo se encuentra en los materiales con fibrocemento, debido a que es un material de refuerzo liviano, con características aislantes y de muy buen comportamiento frente al fuego. Con él se hacen tubos, tejas, láminas (planas y corrugadas) y paneles, entre otros artículos. Para esta aplicación se emplean fibras de los grupos 4, 5 y 6.

Según Tobón (2004), las fibras de los grupos 1 y 2 son empleadas en la industria eléctrica en recubrimientos para aislar conductores eléctricos, por su resistencia al calor y al fuego, a la humedad y a la abrasión. Estas deben estar libres de magnetita, mineral que se forma en el proceso de alteración del olivino a serpentina y que comúnmente acompaña al asbesto, por lo cual se requiere un beneficio previo. En los yacimientos originados en dolomitas serpentinizadas, el asbesto está libre de magnetita.

Las fibras del grupo 3 se emplean como elemento antifuego y aislante térmico en la fabricación de textiles tales como guantes y ropa para bomberos, entre otros. También es utilizado en los sistemas de frenos y de embrague.

Adicionalmente, las fibras de los grupos 3 y 4 se emplean como empaques de sellamiento en conductores de gases calientes, que pueden ser reforzados con metal. Las fibras de los grupos 5, 6 y 7 se emplean en la industria del papel, a las que se les adicionan fibras vegetales o de vidrio. También se utilizan para el recubrimiento de tuberías, para protegerlas de la corrosión (oleoductos) y del ataque de ácidos y álcalis.

En la industria del plástico se emplean fibras de asbesto de los grupos 6 y 7 como refuerzo ideal, porque le proporciona al producto final alta resistencia mecánica, al calor y al fuego, por lo cual se reduce la contracción y el agrietamiento.

Las fibras del grupo 7 son empleadas como rellenos en la fabricación de grasas de lubricación, donde la fibra controla o retarda la disolución y la calidad de flujo de la grasa aun a altas temperaturas. Este grupo de fibras también es utilizado en la industria de la pintura para fabricar pinturas anticorrosivas destinadas a superficies esféricas y redondeadas, por su hábito fibroso y acicular, lo que mejora la adherencia y la distribución en la pieza. Además, ayuda a prevenir el agrietamiento.

2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del asbesto, tales como la mineralogía y composición, los tipos de depósitos a nivel mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales. Además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio de este mineral a escala global.

2.1. Características

Los asbestos son silicatos de hierro, sodio, magnesio y calcio, con estructura cristalina, que se caracterizan por ser fibrosos. Pertenecen al grupo de los anfíboles o de la serpentina. Presentan una densidad relativa de aproximadamente 2.5 y un punto de fusión superior a 1000 °C. Son minerales resistentes al calor, a los álcalis (el crisotilo) y a los ácidos (sobre todo la amosita y la crocidolita). Las fibras de crisotilo son flexibles (por ello son utilizadas en la industria textil), mientras que las fibras de los anfíboles son más quebradizas. Son no combustibles e insolubles; presentan resistencia eléctrica y al desgaste, por lo que se consideran indestructibles (Abú-Shams y Pascal, 2005).

Se identifican seis variedades mineralógicas de asbestos: crisotilo (variedad de serpentina), crocidolita (variedad del anfíbol riebeckita y conocida como *asbesto azul*), amosita (variedad del anfíbol grunerita y conocido como *asbesto marrón*) y los asbestos de los anfíboles antofilita, tremolita y actinolita, que no tienen nombres específicos. En la tabla 1 se muestra la composición química de las diferentes variedades de asbesto.

Tabla 1. Composición química de los asbestos

Tipo	Fórmula	Composición	%
Crisotilo	$Mg_6[(OH)_4Si_2O_5]_2$	SiO_2	37-44
		MgO	39-44
		FeO	0-6
		Fe_2O_3	0.1-5
		Al_2O_3	0.2-1.5
		H_2O	12-15
		CaO	Tr-5
		Na_2O	-
		$CaO+Na_2O$	-
Crocidolita	$Na_2Fe_5[(OH)Si_4O_{11}]_2$	SiO_2	49-53
		MgO	0-3
		FeO	13-20
		Fe_2O_3	17-20
		Al_2O_3	—
		H_2O	2.5-4.5
		CaO	—
		Na_2O	4.0-6.5
		$CaO+Na_2O$	—
Amosita	$MgFe_6[(OH)Si_4O_{11}]_2$	SiO_2	49-53
		MgO	1-7
		FeO	34-44
		Fe_2O_3	—
		Al_2O_3	2 - 9
		H_2O	2 - 5
		CaO	—
		Na_2O	—
		$CaO+Na_2O$	0.5-2.5
Antofilita	$(Mg, Fe)_7[(OH)Si_4O_{11}]_2$	SiO_2	56-58
		MgO	28-34
		FeO	3-12
		Fe_2O_3	—
		Al_2O_3	0.5-1.5
		H_2O	1-6
		CaO	—
		Na_2O	—
		$CaO+Na_2O$	—
Tremolita	$Ca_2(Mg, Fe)_5[(OH)Si_4O_{11}]_2$	SiO_2	53-62
		MgO	0-30
		FeO	1.5-5
		Fe_2O_3	—
		Al_2O_3	1-4
		H_2O	0-5
		CaO	0-18
		Na_2O	0-9
		$CaO+Na_2O$	—
Actinolita	$Ca_2(Mg, Fe)_5[(OH)Si_4O_{11}]_2$		

Fuente: Virta y Mann (1994)

La longitud de la fibra determina en gran parte la aplicación y el valor del asbesto. Las fibras largas dan hilos fuertes; las fibras cortas no pueden hilarse y se emplean especialmente en aislantes y productos de asbesto-cemento. La fibra se clasifica según su longitud, y su calidad varía desde suave y sedosa hasta áspera, de altamente flexible a frágil, y de resistente a débil (González, 1987).

Las fibras de asbesto se pueden presentar en tres formas: fibra cruzada (o *cross fiber*), fibra deslizada (o *slip fiber*) y fibra en masa (*mass fiber*). La fibra atravesada es la forma más común de presentarse. Estas fibras están apretadas unas contra otras, perpendiculares a las paredes de las rocas. Esta disposición es común en serpentina, donde la fibra se encuentra rellenando planos de debilidad, tales como fallas y planos de clivaje en forma de series ramificadas (*stockwork*) a gran escala. La orientación de las fibras puede variar entre normal e inclinada respecto a las paredes de la vena, y se identifican como *fibras oblicuas* Este tipo de fibra, muestra debilidad en el punto donde se dobla.

La fibra desplazada es paralela u horizontal a las paredes de la roca; por eso, se encuentra entretejida entre las paredes. Normalmente se encuentran en fracturas, grietas y desplazamientos, en formaciones de crisotilo y antofilita, y a veces están asociadas a mineralizaciones de fibras atravesadas en forma de *stockwork,* en depósitos compactos de serpentina.

La fibra en masa está normalmente mezclada en la matriz que forma el cuerpo mineral. No existe ninguna forma de orientación de las masas de la fibra, con excepción de una posible estructura estelar radial. La fibra en masa consiste, bien sea en un reemplazamiento completo de la mayoría de los minerales originales por fibra, o en una red densa de finas venas de reemplazamiento. Ambas variedades dan como resultado un alto contenido de fibra corta (González, 1987).

Como el valor comercial del asbesto depende de la longitud de la fibra, es importante realizar una buena clasificación de esta. Para realizar la clasificación de la fibra existen los siguientes métodos: ensayo Bauer, ensayo húmedo, ensayo de área superficial y ensayo Quebec Estándar, que es el método más universalmente conocido (Ruiz, 2006).

2.2. Tipo de depósito

El 98 % de la producción mundial de asbesto corresponde al crisotilo, y de este, la mayoría proviene de depósitos de rocas ultrabásicas como roca encajante (Keith y Bain, 1932; Berger, 1963). El resto de la producción de crisotilo

proviene de calizas dolomíticas serpentinizadas, cuya característica principal es la ausencia de magnetita, impureza comúnmente encontrada en los depósitos asociados con rocas ultrabásicas.

La amosita y la crocidolita provienen de formaciones sedimentarias ferruginosas que han sufrido metamorfismo. Estas dos variedades constituyen el 2 % restante de la producción mundial de asbesto. La tremolita y la antofilita se encuentran asociadas a rocas ultrabásicas muy metamorfizadas.

La mayor parte de la producción mundial del crisotilo proviene de Rusia, Brasil, Kazajistán, Canadá y Zimbabue (USGS, 2006).

Tectónicamente, los depósitos de crisotilo están asociados con acreciones oceánicas, por lo común como parte de secuencias ofiolíticas o dentro de rocas ultramáficas. También se encuentran en intrusiones sinvolcánicas ultramáficas de afinidad komatiítica en cinturones verdes del Arcaico (Hora, 1997). La deformación, bien sea por fallamiento, plegamiento o zonas de cizalladura, juega un papel importante en la localización de depósitos de asbesto (Cooke, 1937).

La edad de los depósitos de asbesto varía ampliamente, desde el Precámbrico más temprano, en Zimbabue y Suazilandia, hasta el Jurásico Superior en California. Los depósitos de Ontario, Ungava y Brasil son de edad Precámbrico, mientras que los de *Eastern Townships,* Vermont y Terranova se asignan al Paleozoico Medio, y se asocian con el plegamiento temprano en la cadena montañosa de los Alpes. Los depósitos de Canadá occidental están relacionados con la orogenia del Paleozoico Superior, mientras que los depósitos rusos tienen edades entre el Paleozoico Temprano y el Paleozoico Superior hasta el Triásico.

2.3. Métodos de prospección

En la prospección minera, la analogía constituye un principio valioso e indispensable. Se deben buscar las zonas donde ya se ha encontrado mineral y aquellas otras cuyas características geológicas son semejantes a las de las regiones productoras ya conocidas. Si los asbestos de crisotilo están asociados con rocas ultrabásicas serpentinizadas, debemos buscar estos cuerpos (González, 1995).

El principio de analogía facilita considerablemente la prospección en búsqueda de asbestos, lo cual es necesario, ya que los yacimientos son estructuras relativamente pequeñas y escasas. El estudio de la interrelación, tanto en espacio como en tiempo, de las diferentes rocas, de su historia geológica y el de las mineralizaciones, puede restringir aún más el campo de la prospección. Sin embargo, el campo puede ser aún demasiado grande para que las labores de exploración, excavación y perforaciones sean prácticas y económicas, y por lo tanto son necesarias nuevas restricciones. Es aquí que debe emplearse la geofísica, ya que las rocas ultrabásicas difieren considerablemente en sus propiedades físicas, susceptibilidad magnética, resistividad y densidad, de las rocas que las rodean. El estudio geofísico, mediante una cuidadosa interpretación de los resultados, elimina en el interior de estos mismos cuerpos extensas áreas donde hay pocas probabilidades de encontrar concentraciones económicas de asbestos.

Los métodos en general incluyen, al igual que en otros minerales, cuatro etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada (UN, 2001).

Los levantamientos geológicos regionales son el primer paso para definir las posibles zonas que contengan asbestos. Levantamientos aeromagnéticos son de gran utilidad para definir y localizar masas de serpentinita. Estos levantamientos, con un control geológico de campo adecuado y levantamientos magnetométricos, pueden usarse para definir zonas de características geológicas de posible interés económico.

Entre los estudios geofísicos se encuentran la aeromagnetometría y magnetometría, utizadas para localizar los cuerpos ultrabásicos y definir depósitos potenciales de asbesto. La aeromagneometría se emplea en las primeras fases de la exploración para localizar dichos cuerpos en un área extensa. La magnetometría se utiliza solo para definir depósitos de asbesto asociados con rocas ultrabásicas, debido a su asociación con magnetita secundaria, que se forma durante la serpentinización. Muchos de estos depósitos contienen más magnetita que serpentina como tal. Adicionalmente, grandes zonas de cizalladura y cuerpos de dunitas serpentinizadas también indican anomalías magnéticas.

Con solo datos geofísicos no puede decirse si los cuerpos anómalos realmente corresponden a un yacimiento. No obstante, la combinación de estos datos con los datos geológicos e información adicional de cualquier otro tipo delimitan áreas de mayor probabilidad de concentración del mineral, en las cuales se llevarán a cabo las últimas pruebas de exploración, tales como trincheras y perforaciones con broca de diamante.

La combinación de todos los datos obtenidos durante la exploración proporciona la información final para la estimación de tonelaje, tipo de depósito, programas de explotación y valor del posible yacimiento, así como para tomar decisiones sobre su explotación.

Por lo tanto, los pasos generales que deben seguirse en la prospección de asbestos asociados con cuerpos de rocas ultramáficas serpentinizadas son los siguientes:

1. Análisis regional de zonas de posible interés basado en los mapas geológicos regionales.
2. Levantamientos aeromagnéticos en zonas definidas en la etapa anterior.
3. Análisis de los datos aeromagnéticos obtenidos y delimitación de zonas de interés.
4. Levantamientos geológicos de campo y levantamientos magnetométricos en zonas definidas en la etapa anterior.
5. Trincheras, perforaciones en zonas de interés definidas en el proceso anterior.
6. Análisis de toda la información obtenida para definir el potencial y la factibilidad de explotación de los asbestos.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

El desarrollo de la minería de asbestos ha estado controlado por la innovación de equipos y métodos de minería. Métodos manuales simples fueron empleados en labores poco profundas a cielo abierto. Hubo una época, cuando los patios de las labores a cielo abierto eran muy profundos, en las que se usaban grúas suspendidas de cables aéreos. Hoy en día, en minas a cielo abierto, el uso de potentes palas que cargan el mineral directamente en camiones de trabajo pesado ha desplazado todos los otros sistemas de carga y transporte.

En el pasado se emplearon métodos de explotación subterránea, como el de derrumbe y extracción por subniveles, la excavación de bloques y el método de los *glory holes*. En algunos casos, arrancadores y elevadores conducen el material fragmentado desde los sitios de arranque hasta superficie, y en otros este pasa directamente por grandes cribas. Esta tendencia se ha invertido, y actualmente predominan métodos de explotación a cielo abierto.

Se considera, en general, que los métodos de minería de superficie son más ventajosos en cuanto a la recuperación, el control de calidad, la economía y seguridad. El cambio a esta tendencia se dio principalmente debido a innovaciones en el equipo de minería: palas cuya capacidad varía entre 1.91 m^3 y 11.47 m^3; camiones con capacidad de carga de 25 a 200 toneladas; los equipos de perforación se han mejorado notablemente, y se han introducido nuevas técnicas y agentes para voladuras. Estas innovaciones permitieron incrementar la relación de estéril a mineral de 3:1 y más, con lo cual se prolonga la vida económica de las labores a cielo abierto.

En África, gran parte del crisotilo se explota por minería subterránea. Los cuerpos de mineral son por lo general de forma tabular, con un buzamiento fuerte, con el resultado de que el límite económico para su explotación a cielo abierto se alcanza en las primeras etapas de producción. El espesor del mineral en las minas más grandes varía entre 20 y 60 m, con un máximo de 120 m. Algunos cuerpos mineralizados, especialmente en el distrito Shabani y de Zimbabue, son muy extensos en longitud: alcanzan una extensión hasta de 5 km y una profundidad de 300 m. Para ellos se han empleado diversos métodos de explotación subterránea, que incluye el de cortes y llenos. Hoy en día, el método de excavación y extracción por subniveles es el responsable de la mayor parte del tonelaje extraído (Virta y Mann, 1994).

Dicho método consiste en iniciar la excavación con voladuras realizadas hacia arriba desde los niveles inferiores, y el desarrollo y retroceso se efectúa a lo largo del rumbo. En algunos casos, altas presiones han desarrollado un efecto de arco, que se disipa al explotar una franja vertical que puede extenderse hasta la superficie y hacia donde el material ha colapsado. En el método de extracción por subniveles se puede abrir un canal a través del centro del cuerpo de mineral; las perforaciones que se desprenden de los túneles se vuelven hacia el canal, y la minería avanza retrocediendo en dos direcciones, alejándose de las aberturas realizadas.

En África, gran parte de la amosita y de la crocidolita han sido extraídas de excavaciones pequeñas y estrechas a cielo abierto, o de túneles pequeños casi horizontales que siguen la franja portadora de mineral. En la zona de Penge las operaciones se han desarrollado a mayor escala y profundidad. La principal formación de hierro productora tiene un espesor muy constante, de cerca de 1.4 m, con un buzamiento de unos 20°. Un frente avanza a lo largo del rumbo perforado en círculos o secciones de 1.8 m con martillos neumáticos. El material fragmentado se retira con palas hacia atrás, y se dejan remanentes en forma de pilares temporales para soportar el techo. El material restante se carga a mano en unos pequeños carros, se eleva a un transportador horizontal y se lleva a una planta de clasificación para separar el material de desecho. Luego es enviado a la planta de trituración y a la planta de beneficio.

Anteriormente la porción portadora de fibra se escogía a mano bajo tierra; de esta manera se perdían grandes cantidades que se quedaban en los pilares. Las fracturas de la formación de hierro proporcionan bloques rectangulares que favorecen la construcción de los pilares. La banda por-

tadora de asbesto contiene hasta un 30 % de fibra, de modo que la relación estéril a mineral funciona bien para el sistema de explotación empleado (Virta y Mann, 1994).

El proceso de beneficio es diseñado de acuerdo con las características de cada cuerpo. La fibra se obtiene mediante el proceso en seco, que ha sido empleado casi exclusivamente desde que se empezó a beneficiar el asbesto en Canadá, hace unos noventa años. Sin embargo, en algunos casos se ha realizado beneficio en húmedo de alguna cantidad de fibra.

En los últimos años se han presentado algunos cambios en el proceso básico. Las principales mejoras se han desarrollado en los procesos de manejo del material, empaque y métodos de transporte. Los métodos mejorados desarrollados por la industria minera del asbesto han hecho posible, tanto para el productor como para el cliente, almacenar, transportar, recibir y usar la fibra en un ambiente relativamente libre del polvo.

Las etapas del proceso de beneficio de fibras procesadas consisten en trituración y transporte, secado, procesamiento de roca y procesamiento de la fibra. En la etapa de trituración y transporte, el material sufre una disminución en su tamaño antes de ingresar a la planta de beneficio. La etapa de secado consiste en extraer la humedad contenida en el mineral mediante el intercambio de calor que se presenta entre el aire caliente que viene de la cámara de combustión y el mineral que es alimentado al secador después de la trituración secundaria. Este proceso se inicia cuando se realiza la combustión dentro de una cámara sellada; simultáneamente se hace pasar el aire que se desea calentar, mediante un tiro inducido por un ventilador. Dicho aire es conducido mediante una tubería con cuatro conectores al secador, que es una cámara vibratoria a través de la cual pasa el mineral. Dentro de la cámara vibratoria se efectúa la transferencia de calor por conducción, y el mineral pierde su humedad.

La etapa de procesamiento de la roca se inicia desde la banda alimentadora, que recibe el material fino que viene del secador y el material grueso que viene por la banda paralela. El material alimentado por dicha banda es transportado hacia los elevadores, cribas y molinos con el fin de separar la fibra de la roca e iniciar un proceso de clasificación de la fibra larga y corta. En la zona de purificación de la fibra se usan tamices, zarandas, separadores de gravedad específica por aire y variaciones de estos, como clasificadores que limpian y separan la fibra en las longitudes correspondientes a calidades estándar.

Durante la fase de explotación y beneficio, si se usan medidas básicas de control, buenos métodos de limpieza y prácticas laborales, se pueden lograr niveles de exposición inferiores a 1 fibra/ml. Estas medidas incluyen lo siguiente:

- Control en la fuente: el polvo debe controlarse lo más cerca posible de la fuente, lo cual aumenta la eficacia del proceso, reduce los costos e impide la dispersión del polvo en áreas adyacentes.
- Control técnico: esto se logra con la utilización de equipos como campanas para polvo, tubería, recolectores de polvo y aire de reemplazo. La ventilación industrial se recomienda para operaciones de desembolsado, mezclado, pesada, corte y molienda, entre otras. Para controlar el polvo de asbesto que queda en el aire se emplea una cámara de filtración; el algodón es el material más eficaz para fabricar los filtros de dicha cámara. El aire limpio pasa luego a través de un ventilador de succión y se arroja al exterior.

Las prácticas laborales necesarias en la planta de procesamiento incluyen humectación donde pueda aplicarse este proceso, la limpieza de cualquier desecho generado durante la fabricación, aspiración o remoción por humectación de las astillas y piezas pequeñas que estén dispersas en la fábrica, no barrer en seco y usar aire comprimido para fines de limpieza. Con respecto a la limpieza, debe realizarse por medios húmedos, los cuales evitan que se generen altos niveles de polvo. Es posible que se requiera ocasionalmente el uso de respiradores y ropa especial.

En algunos casos, en la aplicación de asbesto para materiales de fricción o productos de cemento, estos pueden ser cortados antes del curado, lo cual genera altos volúmenes de polvo. Si los productos de alta densidad se cortan con sierra, se deben emplear campanas y sistemas de ventilación por aspiración. Es posible utilizar agua para suprimir el polvo dirigiendo un chorro o agua pulverizada hacia la hoja de la sierra o de la herramienta de perforación o corte. En cuanto al almacenamiento, la mayor parte de la producción se empaca a presión en sacos tejidos y polilaminados de 50 kg, tanto para el uso doméstico como para exportación. También se suministra fibra empacada en papel Kraft soluble en agua.

2.5. Recursos, reservas y comercio

Los datos sobre reservas de asbesto en el mundo no son muy conocidos; por lo tanto, no se puede hacer una estimación precisa de la cantidad de mineral. Sin embargo, el tamaño de estas es considerable y puede suplir por muchos años la producción actual.

En la tabla 2 se observa el comportamiento de la producción mundial por países en el periodo 1996-2016, en el cual ha tenido un valor constante de 2 000 000 de toneladas métricas. En la figura 1 se observan los principales países productores de asbesto durante el año 2016.

En los últimos veinte años la producción ha presentado un comportamiento levemente decreciente. El principal productor a escala mundial de asbesto en el año 2016 fue el continente asiático, representado por Rusia con un 54 %, China con un 19 % y Kazajistán con un 10 %, que sumaron el 83 % de la producción total; estuvieron seguidos por Brasil, con un 2 %, como se observa en la figura 2.

Tabla 2. Producción mundial de asbesto en el periodo 1996-2016 (en toneladas métricas)

País	1996	2001	2006	2011	2016
Brasil	190 000	170 000	236 000	270 000	300 000
Canadá	511 000	340 000	240 000	100 000	
China	240 000	260 000	400 000	400 000	400 000
Kazajistán	250 000	125 000	350 000	210 000	200 000
Rusia	800 000	750 000	925 000	1 000 000	1 100 000
Sudáfrica	95 000	19 000			
Zimbabue	150 000	115 000	110 000		
Otros	155 000	92 000	80 000	20 000	50 000
Total	2 391 000	1 871 000	2 341 000	2 000 000	2 050 000

Fuente: USGS (2017)

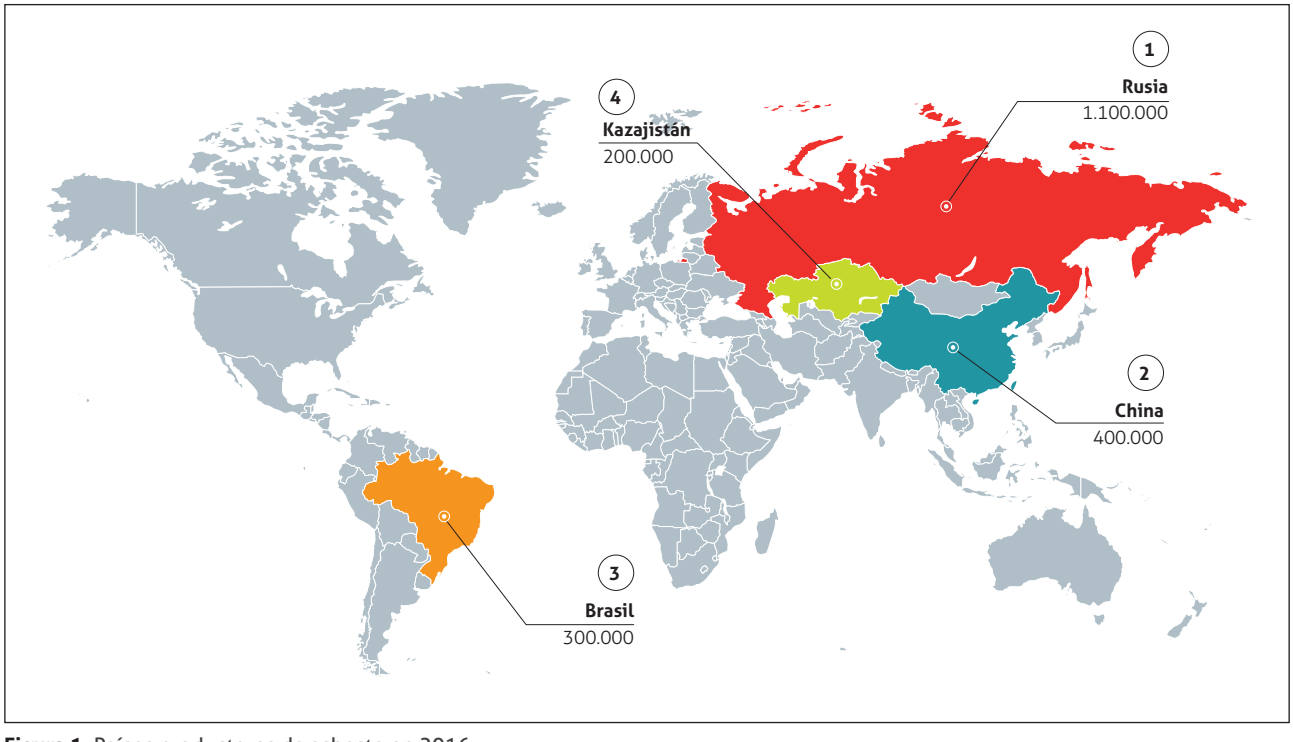


Figura 1. Países productores de asbesto en 2016

Fuente: USGS (2017)

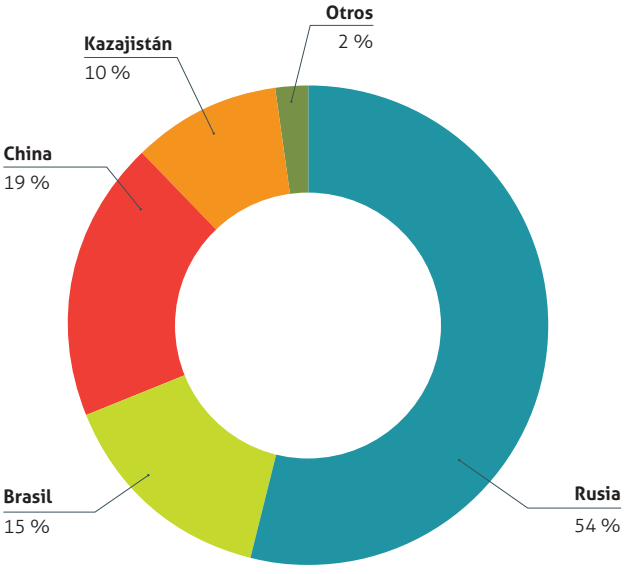


Figura 2. Participación en la producción mundial de asbesto en el periodo 1996-2016

Fuente USGS (2017)

El consumo de asbesto en Estados Unidos presenta un comportamiento decreciente desde 1990, cuando había un consumo de 40 000 toneladas métricas, que ha disminuido año tras año hasta quedar en 340 toneladas métricas en el año 2016. Esto se ha debido a los efectos nocivos de dicho material para la salud y a los múltiples sustitutos que se han hallado. Globalmente, el mayor uso del asbesto sigue encontrándose en la industria del cemento.

El precio del asbesto varía según el tipo de fibra: cruda o procesada. La fibra cruda presentó su mayor valor que la procesada en 2015, cuando llegó a USD 1780/t, mientras que la fibra procesada grado 3 logró un valor de USD 1360/t; la de grado 4 se cotizó en USD 1960/t.

2.6. Perspectivas

Desde el año 2002 se observa una tendencia a la baja en la producción de Estados Unidos, que se mantiene actualmente y probablemente continuará por un par de años más. Este decaimiento se debe a la legislación actual sobre el uso seguro del asbesto (Virta, 2006).

3. Asbesto en Colombia

En Colombia se conocen varias manifestaciones de asbesto. La ocurrencia del crisotilo asociado con rocas ultramáficas serpentinizadas hace que solo las regiones del país donde se encuentran estas rocas sean aptas para adelantar allí su búsqueda. En nuestro país, los cuerpos conocidos de serpentinita se encuentran, en su mayor parte, asociados a la zona de falla de Romeral, entre las cordilleras Central y Occidental. Varias de las manifestaciones registradas en Colombia corresponden a antigorita fibrosa y picrolita, desarrolladas a lo largo de planos de cizalladura en cuerpos de serpentinita, pero carecen de valor económico.

El yacimiento de Las Brisas se encuentra localizado en el municipio de Campamento (Antioquia), a 30 km de la troncal del Norte y a 135 km de Medellín. Su conocimiento se remonta a 1948, cuando este depósito fue registrado en el Inventario Nacional Minero. A partir de ese año, diferentes entidades privadas han hecho continuos estudios de exploración, hasta que a finales del año 1980 se inició la producción.

3.1. Geología regional

En Colombia, el ambiente geológico donde se encuentran complejos ofiolíticos es una amplia franja localizada en el occidente del país, en la cordillera Occidental, y en el límite entre esta y la cordillera Central. Este conjunto de rocas máficas y ultramáficas está ubicado en el denominado sistema de fallas Cauca-Romeral (figura 3), que presenta un estilo estructural de fallamiento imbricado y de convergencia variable, dentro del cual hay una secuencia de estratigrafía incierta y fragmentos de corteza siálica y simática, de edades variables desde el Paleozoico hasta el Cretáceo (Ortiz, 2004). Las provincias litosféricas sobre las que se encuentran son, de occidente a oriente, por una parte, la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO), que presenta composición simática y edad Cretácica, y por otra, la Provincia Litosférica Oceánica Nesoproterozoica Arquía (PLONA) y la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (PLCMG); estas dos últimas presentan una composición siálica y edad Precámbrica (Gómez *et al.*, 2006).

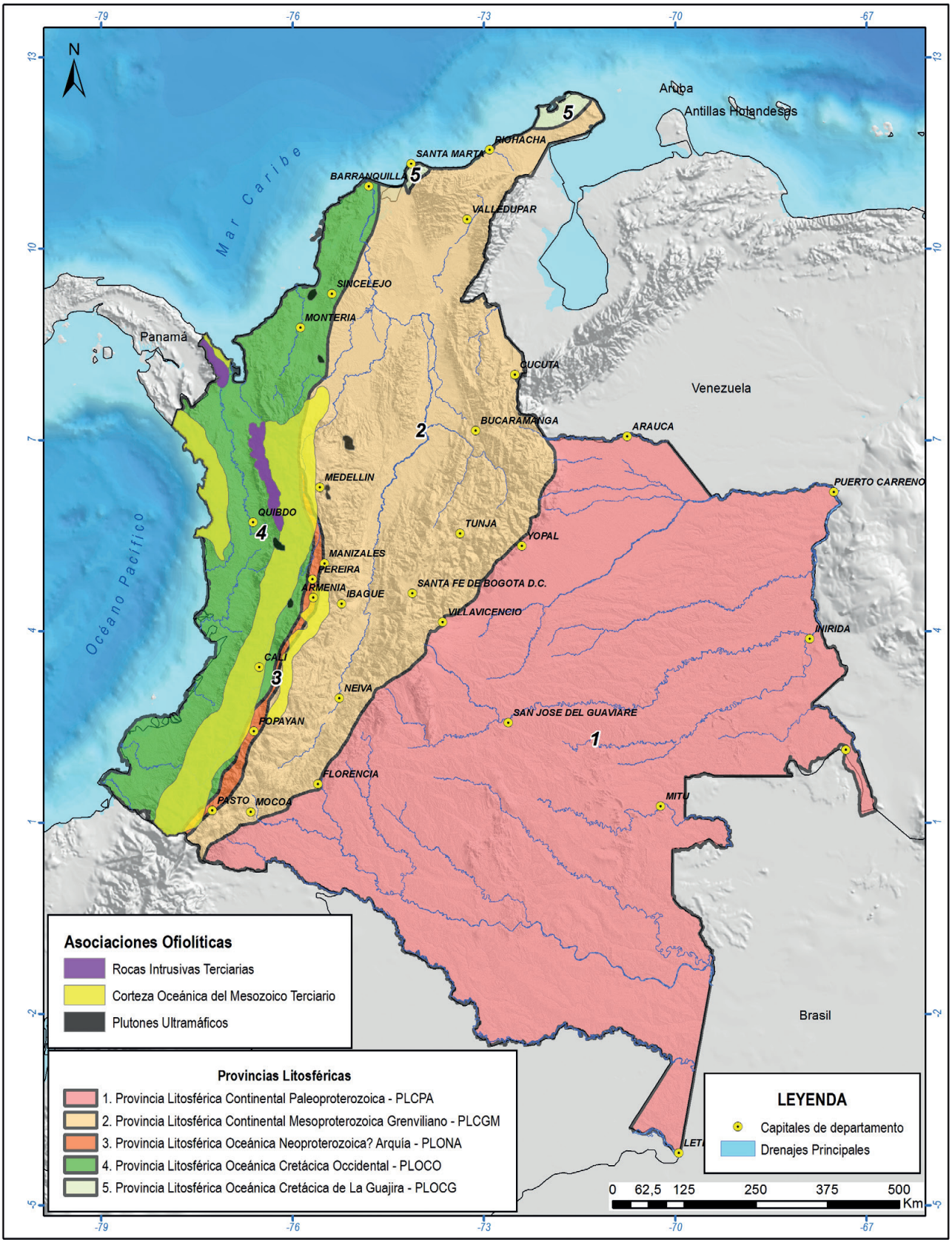


Figura 3. Sistema de fallas Cauca-Romeral con ofiolitas asociadas

Fuente: (Ortiz, 2004)

Es posible describir esta franja como una provincia tectónica específica. En los mapas de Terrenos Geológicos de Colombia es denominada como *terreno Cauca-Romeral*, y en él se mezclan estructuralmente varias litologías, que incluyen desde basaltos toleíticos, a veces con estructura en almohadilla, diabasas y sedimentos marinos, gabros, peridotitas y anfibolitas, hasta esquistos muy variados, a menudo cubiertos por rocas sedimentarias terciarias. También hay en esta franja plutones calcoalcalinos e intrusivos subvolcánicos (Ortiz, 2004).

Según Barrero (1974, en Ortiz, 2004), la zona de falla Cauca-Romeral es el sitio de convergencia de la corteza oceánica y la corteza continental. El sistema de Romeral se puede igualmente considerar como una provincia metalogénica en la que existen o pueden existir varios tipos de mineralización.

3.2. Geología local

Los asbestos se encuentran relacionados con ultramafitas serpentinizadas, el depósito es de tipo masivo formado por venitas de crisotilo de fibra cruzada de 1 a 20 mm de ancho, encajadas en una masa de serpentinita fuertemente cizallada (González, 2001).

La fibra recuperada corresponde a los grados de más alto valor:

La Zona R es el bloque mejor estudiado y en él se encuentra la mayor parte de las reservas probadas de fibra. En la Zona F la fibra es más espesa, difícil de separar, de color verdoso en lugar del blanco característico del crisotilo y está asociada con concentraciones de magnetita, que en algunos lugares reemplaza parcial o totalmente la fibra. Además, la roca ultrabásica encajante del crisotilo es de color más oscuro, de grano más fino, y muestra un menor grado de serpentinización (Harris, 1973, en González, 1987).

En la Zona G, la fibra por lo general es del tipo cinta, y en algunos lugares se encuentran grandes concentraciones de la fibra, a veces asociada con magnetita; esta zona no ha sido explorada en su totalidad. La otra zona, denominada O, que tampoco lo ha sido, contiene fibras de alta resistencia, apropiada para la industria de asbesto-cemento, que se separa fácilmente de la serpentinita encajante.

En la Zona R existe un área de alteración hidrotermal de características geológicas relevantes. Se encuentra en el tope del cuerpo principal de mena, y no hay duda de que existe una relación directa entre esta fuerte alteración hidrotermal y la presencia de un cuerpo rico en crisotilo por debajo, y pobre por encima (Harris, 1973). El talco es el principal mineral hidrotermal en esta zona, pero ocasionalmente hay áreas de cuarzo de varios metros de espesor, y algunas veces la serpentinita ha sido transformada en una roca blanca en la que aún se observan restos de la estructura original. Por lo general, las zonas de mayor alteración hidrotermal coinciden con bajos topográficos (Harris, 1973, en González, 1987).

3.3. Situación actual de la minería

Actualmente, en Colombia solo se desarrolla minería de asbesto en el municipio de Campamento (Antioquia), y la empresa que se encarga de ello es la Minera Las Brisas S. A.

3.3.1. Potencial

En Colombia existen ambientes favorables para el desarrollo de depósitos de asbestos en los complejos ofiolíticos en una amplia faja localizada en el occidente del país, en la cordillera Occidental y en el límite entre esta y la cordillera Central.

Las Brisas es el único depósito económicamente explotable que se ha encontrado en la cordillera Central. Está localizado a 135 km de Medellín y fue explorado primero por la Compañía Canadiense Johns-Marville Co. Ltd., entre 1952 y 1953; posteriormente, en 1964 Nicolet Industries Inc. complementó el estudio del área mediante el levantamiento magnetométrico y nuevas perforaciones. Esta cedió sus derechos en Las Brisas a una compañía suiza que, junto con inversionistas colombianos, constituyó la sociedad denominada Minera Las Brisas S. A. hacia finales de 1980 esta nueva compañía hizo los montajes necesarios para empezar la explotación a cielo abierto.

En 2012 la Superintendencia vendió la empresa. Los compradores son colombianos y crearon una nueva compañía que se llama Bricolsa. Pagaron 4500 millones de pesos, tienen licencia para explotar 5500 hectáreas y aspiran producir 1500 toneladas mensuales de asbesto (Semana, 2013).

Las reservas actuales probadas son del orden de 2 592 000 toneladas, de las cuales solo se ha extraído menos del 10% estimándose que a una tasa de extracción de 1500 toneladas mes, las reservas analizadas duraran aproximadamente 30 años (Ruggiero, 2015).

En la figura 4 se evidencia la información extraída del *Mapa de Zonas con Potencial Integral de Colombia para Recursos Minerales* (SGC, 2011), la distribución espacial y temporal de depósitos y ocurrencias o manifestaciones minerales en un contexto geológico del *Mapa Metalogénico de Colombia versión 2016* con la información validada a la fecha (SGC, 2016) y los títulos mineros vigentes (ANM, 2017).

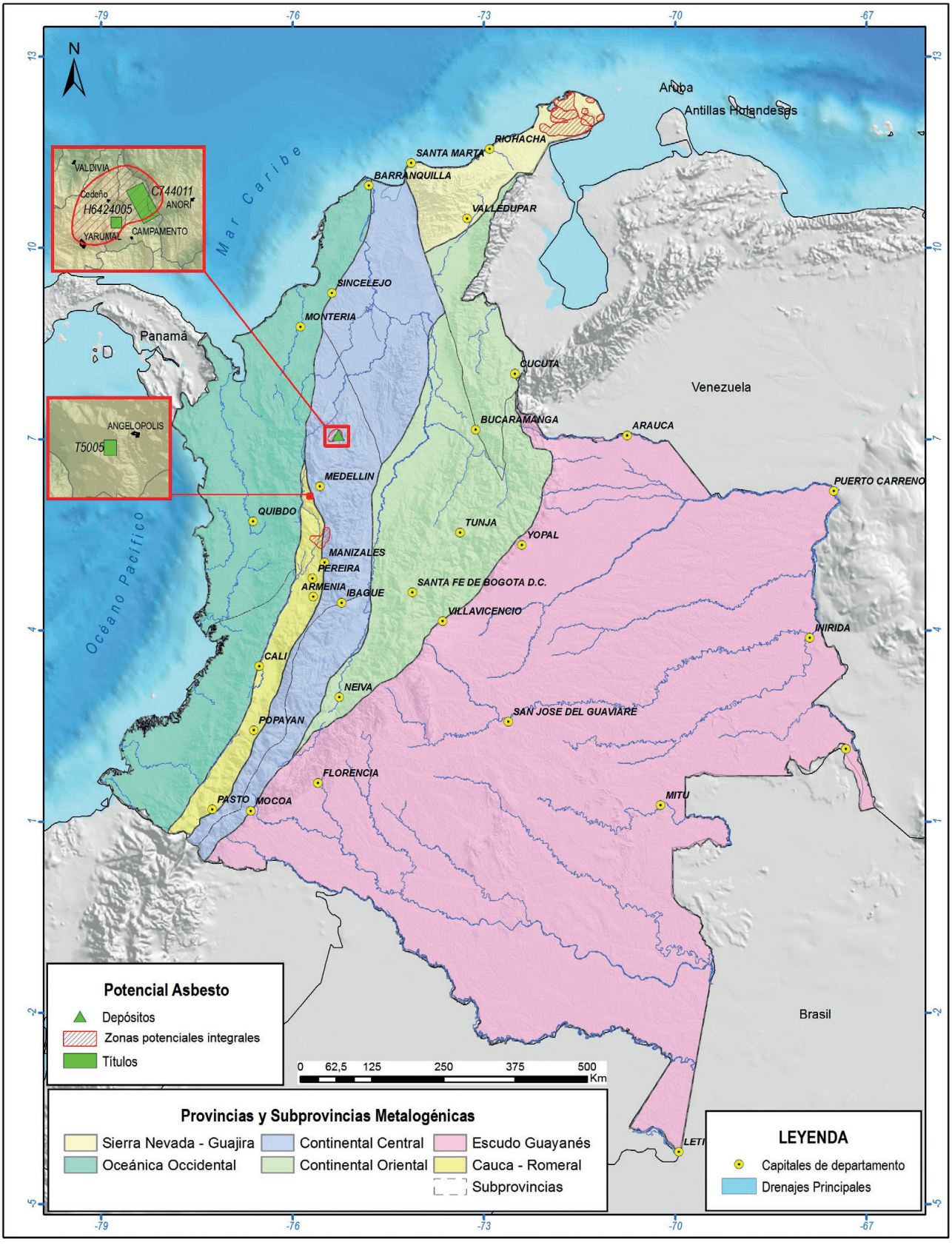


Figura 4. Asbesto en Colombia

Fuente: Catastro Minero Colombiano en ANM, 2017; SGC, 2011 y SGC, 2016.

3.3.2. Comercio

Según la información suministrada por el UPME (2017), en Colombia son mayores las importaciones que las exportaciones de asbesto. Con respecto a las importaciones, se registra una curva semirregular, con unos periodos crecientes y otros decrecientes; el pico máximo se encuentra en el año 2015, con un valor de 25 000 000 de toneladas métricas y un pico mínimo registrado en el año 2008, con un valor de 4 000 000 toneladas métricas (figura 5). La mayor parte del asbesto importado por Colombia procede de Canadá, y la descripción arancelaria es amianto (asbesto).



Figura 5. Importaciones de asbesto en Colombia

Fuente: UPME (2017)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

El resultado de las investigaciones médico-científicas sobre el asbesto tipo crisotilo (Chrysotile Institute, 2015), indican lo siguiente:

1. El crisotilo solo constituye un riesgo cuando se lo inhala; su ingesta no representa riesgo.
2. El crisotilo es menos biopersistente y menos riesgoso que las variedades provenientes de anfíboles.
3. Existe una muy débil asociación entre la exposición al crisotilo y el mesotelioma.
4. En bajos niveles de exposición, el asbesto crisotilo no representa ningún riesgo detectable para la salud humana.

Se han identificado tres tipos de enfermedades respiratorias relacionadas con la exposición al asbesto: la asbestosis, el mesotelioma y el cáncer de pulmón, que se pueden manifestar de 10 a 40 años después de la primera exposición.

En 1977, la Agencia Internacional sobre la Investigación del Cáncer catalogó todos los tipos de fibras del asbesto como cancerígenos. Sin embargo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la población en general no corre un riesgo detectable cuando se expone a niveles bajos de asbesto entre (0.0001 y 0.001 fibras/ml) presente en el medio ambiente.

En 1989, el grupo de expertos de la Organización Mundial de la Salud recomendó no sobrepasar el límite de exposición de 1 fibra/ml.

Además, hay consenso internacional en que el crisotilo es menos peligroso que las variedades anfibólicas del asbesto. El crisotilo no solo es una materia menos polvorienta, dadas sus propiedades físicas, sino que también tiende a desintegrarse y disolverse en los fluidos corporales, por lo que se elimina más fácilmente de los pulmones mediante mecanismos de defensa naturales, mientras que las variedades anfibólicas son más polvorientas y más durables, razón por la que persisten en los pulmones (Chrysotile Institute, 2015).

De acuerdo con las recomendaciones de las reuniones científicas, convocadas por la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la reglamentación actual se dirige hacia una prohibición completa de las formas comerciales de asbesto anfibólico (crocidolita y amosita) y de los productos aislantes friables de baja densidad; mantiene, no obstante, el uso de los productos crisotílicos de alta densidad en fibrocemento y forros de frenos, entre otras aplicaciones (La y Qama, 1993).

Actualmente, en el Congreso colombiano cursa un proyecto de ley para prohibir el uso del asbesto en la industria en todo el territorio nacional.

En cuanto a los sustitutos, numerosos materiales pueden reemplazar al asbesto, entre los que se incluyen el silicato de calcio, la fibra de carbono, fibra de celulosa, fibra cerámica, fibra de vidrio, fibra de acero, wollastonita y varias fibras orgánicas, tales como aramida, polietileno, polipropileno y politetrafluoroetileno. Varios minerales no fibrosos o rocas, tales como perlita, serpentina, sílice y talco, también se consideran posibles sustitutos del asbesto en productos en los que no se requieren las propiedades de refuerzo de las fibras. En la industria de cloroalcalinos, la tecnología de células de membrana es una alternativa a los diafragmas de asbesto.

Bibliografía

Abú-Shams, K. y Pascal, I. (2005). Características, propiedades, patogenia y fuentes de exposición del asbesto. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 28(Supl 1), 7-11.

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2017). *Estado actual de títulos y solicitudes mineras en Colombia*. Bogotá.

Bates, R. (1969). Metamorphic minerals: asbestos. En *The geology of industrial rocks and minerals*. New York: Dover Publ.

Berger, H. (1963). *Asbestos fundamentals*. New York: Chemical Publi.

Chrysotile Institute (2015). *Protecting worker health: Control begins at the source*. Disponible en http://www.chrysotile.com/en/chrysotile/hltsfty/health.aspx.

Cooke, H. (1937). *Thetfors, disroeli and eastern half of warwick map areas*. Quebec: Geological Survey of Canada.

Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al*. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas.

González, H. (1987). Asbesto. En *Recursos minerales de Colombia* (vol. II). Bogotá: Ingeominas.

González, H. (1995). Asbesto. *Recursos minerales estratégicos para el desarrollo de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

Gonzáles, H. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia. Memoria explicativa*. p 210. Medellín: Ingeominas.

Harris, H. (1973). How Nicolet proved and evaluated Colombian asbestos deposit. *World Mining*, 26 (13), 42-46.

Hora, Z. (1997). *Ultramafic-hosted chrysotile asbestos*. Victoria: British Columbia Ministry of Employment and Investment.

La y Qama (1993). *Safe use of chrysotile asbestos: A manual on preventive and control measures*. Quebec: Instituto del asbesto, Asociación Quebequense de Minas de Asbesto.

Keith, S. y Bain, G. (1932). Chrysotile asbestos: 1. Chrysotile veins. *Economy Geology*, 27, 169-188.

Ortiz, F. (2004). Guías para la localización de metales preciosos en Ofiolitas colombianas. *Dyna*, 71 (142), 11-23.

Revista Semana. (2013). *La polémica mina que revivió en Antioquia*. Disponible en https://www.semana.com/nacion/articulo/la-polemica-mina-revivio-antioquia/350344-3

Ruiz, J. (2006). *Mejoramiento de la productividad de Minera las Brisas S. A*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Ruggiero, R. (2015). *Presentación Bricolsa SAS*. Disponible en https://prezi.com/mbodfyhebvut/presentacion-bricolsa-sas/

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2011). *Mapa de zonas potenciales integrales para recursos minerales. Esc: 1: 1 000 000*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Mapa metalogénico de Colombia. Esc: 1: 1 500 000*. Bogotá.

Tobón, J. (2004). *Rellenos industriales minerales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

UN (2001). *Guidelines to the United Nations International Framework Classification for Reserves/Resources: solid fuels and mineral commodities*. New York: UN ECE Committee on Sustainable Energy.

UPME (2017). *Reportes de minería*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/Busqueda.aspx.

USGS (2006). Asbestos. En *2006 Minerals Yearbook*. Washington.

USGS (2017). *Asbestos: Statistics and information*. Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/asbestos/.

Virta, R. (2006). *Asbesto*. New York: USGS.

Virta, R. y Mann, E. (1994). Asbestos. En *Industrial Minerals and Rocks* (6.ª ed.). Bloomington: M. A. Society for Mining, & D. D.



Barita
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Barita

Francisco J. Zambrano Ortiz

Citación: Zambrano, F. J. (2019). Barita. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El 90 % de la barita que se produce en el mundo es utilizada especialmente en lodos de perforación de pozos de petróleo. Los precios del petróleo en los mercados mundiales oscilan en torno a los USD 50 el barril, a la espera de que aumente su valor, para que sea determinante en la búsqueda de nuevos campos petrolíferos; este es un factor multiplicador de la demanda de barita a escala mundial. Estos espacios económicos a futuro serían favorables para los productos mineros nacionales, y podrían ser aprovechados para impulsar las investigaciones geológico-mineras y también la realización de ensayos de beneficio y concentración mineral para obtener productos de la más alta calidad, que puedan ser utilizados en la sustitución de las importaciones.

El nombre barita proviene de la palabra griega "barys", que significa pesado debido a su alta gravedad específica de 4.5. La evolución histórica de su uso ha seguido el progreso tecnológico. En la Edad Media, al triturar el mineral, se descubrió su luminosidad, y los alquimistas la llamaron "la piedra filosofal de Bolonia". Por esta propiedad, que deriva del color blanco del mineral puro, se usó primero en el sector de la fotografía. En los primeros años del siglo XX, de hecho, se empezó a aplicar capas finísimas de polvo de Barita como fondo del papel fotográfico para darle brillo (Bariblock, s.f).

La llamada *barita primaria* es el primer producto comercializado, que incluye barita cruda (como sale de la mina) y los productos obtenidos por métodos de beneficio, tales como la flotación, la separación gravimétrica, el cribado, el lavado, etc. La mayoría de las baritas crudas requieren de tratamiento para mejorar su pureza y elevar su tenor. Los minerales más importantes son la barita (sulfato de bario) y la witherita (carbonato de bario) (Searls, 2002).

El sulfato de bario es virtualmente inerte, pero los compuestos solubles en agua son tóxicos si se ingieren.

1. Usos

La barita ($BaSO_4$) es un mineral vital en la industria petrolera, que consume el 90 % de la producción total en la preparación de lodos, como ingrediente pesado y homogéneo. El restante 10 % de la producción de barita se usa en la manufactura de productos químicos, vidrio, pigmentos, filtros y caucho, en mezclas de diferentes tipos.

En la industria petrolera, desde 1926 la barita se ha venido utilizando en forma continua en lodos de perforaciones de petróleo y gas. Se utilizan en perforaciones profundas de pozos, específicamente para la exploración y evaluación de depósitos minerales, y en perforaciones para la toma de muestras de rocas que serán sometidos a ensayos geotécnicos en cimentaciones de obras civiles. Forma parte de la composición de las disoluciones arcillosas empleadas en los lodos, los fluidos que circulan en los pozos lubrican la broca y equilibran la presión de formación.

Los lodos son, fundamentalmente, una mezcla de agua, arcilla (bentonita) y barita en diferentes proporciones, que varían dependiendo de las condiciones locales del reservorio. El lodo debe tener una gravedad específica de 2.5. Particularmente, la barita es un mineral limpio, fácil de manipular, blando (no es abrasivo), pesado y virtualmente inerte, comparado con muchos otros materiales pesados (Hora, 1996).

El control de la densidad, la viscosidad, el pH y demás propiedades del lodo es una operación de rutina que se realiza de manera permanente durante el desarrollo de una perforación, toda vez que para este proceso se utilizan bombas especiales de gran potencia y capacidad, suficientes para mover grandes volúmenes de lodo (Hora, 1996).

En una perforación rotativa, el lodo se inyecta por el tubo interno, penetra hasta el fondo del pozo y entra por los orificios de la broca y la lubrica; continúa su recorrido y regresa a la superficie, por el espacio que media entre la tubería de

perforación y las paredes del pozo; por su gran densidad y presión, trae consigo a la superficie los ripios cortados por la broca. A su vez, cumple otra función importante, como es ejercer presión en las paredes del pozo para garantizar su estabilidad y evitar la entrada de gases y fluidos al pozo. De los cortes de rocas traídas por el lodo se recolectan muestras a intervalos determinados, para adelantar el estudio y la descripción litológica de las formaciones geológicas.

La demanda de barita crece cuando aumentan las perforaciones de pozos de petróleo, por la importancia que este mineral representa en la preparación de lodos. Por lo tanto, al disminuir la actividad exploratoria, el mercado decae, y cuando la actividad petrolera se reactiva, la demanda del producto aumenta; sin embargo, muchas veces la infraestructura disponible es insuficiente para atender la demanda del producto (Brobst, 1994).

La barita de lodos de perforación tiene las siguientes especificaciones: el mineral debe triturarse finamente, por lo menos el 97 % del peso debe pasar malla 200 (*Tyler Mesh*) y no más del 30 % del peso puede ser menor de 6 µm de diámetro efectivo, medido mediante el uso de técnicas de sedimentación. El color de la barita puede ser azul, negro, carmelita o gris (Searls, 2002).

La barita debe tener la densidad suficiente y peso específico mínimo de 4.2; ser blanda, para no deteriorar los orificios de la broca tricono, químicamente inerte y con un contenido no mayor de 250 mg/kg de sales alcalinas solubles. Puede tener un pequeño porcentaje de óxido de hierro, pero no debe presentar interferencias a medidas magnéticas tomadas con instrumentos que se utilizan en los pozos durante el proceso de perforación (American Petroleum Institute, 1993). Como minerales sustitutos en lodos de perforación, aunque menos frecuentes, se encuentran la celestita y hematina sintética, que se manufacturan en Alemania (Searls, 2002).

Otros usos: la barita se usa en la manufactura de vidrio, en cisternas continuas. La adición de barita homogeneizada en la fundición da un mayor brillo, claridad y mejor acabado de los vidrios.

La barita sin tratar, ya sea sin blanquear o blanqueada con ácido sulfúrico son un filtro industrial común, extensor y agente pesado. La industria del caucho es el mayor consumidor de barita como relleno. En la fabricación de cartulina, papel de impresión, cartas de juegos, terminales de cordeles especiales, encofrado de superficies de fricción tales como frenos y embragues de vehículos, enchapes de manijas, plásticos y rótulos (Brobst, 1994).

La barita se usa como blanqueador en pintura de plomo. Por su bajo índice de refracción, la barita se utiliza para cubrir señales, a precios mucho más cómodos que los de otros productos. Por su baja capacidad de absorción en aceite, se usa para conservar pinturas y como fijador de color (Brobst, 1994).

En la industria de la construcción, la barita se usa en tramos de agregados de concreto, también para dar mayor peso a tubería enterrada en áreas pantanosas y para proteger reactores nucleares.

Por su poder de absorber rayos gamma, la barita se utiliza para reducir los costos del plomo necesario en las instalaciones nucleares. Además, Las cavidades en las llantas de equipos pesados utilizados en la construcción de carreteras pueden rellenarse parcialmente con una mezcla de barita para dar peso y ayudar a la compactación de zonas de rellenos (Brobst, 1994).

Las cerámicas de bario tienen algunos usos industriales relevantes. Las propiedades electromecánicas del bario hacen que las cerámicas de titanato de bario sean útiles en la industria electrónica. Las cerámicas de ferrato de bario se usan en magnetos permanentes (Brobst, 1994).

Como pigmento, la barita se usa como un sulfato natural, o sulfato blanco, como fijador y litopón. Molida, blanqueada y tratada se usa como relleno en pinturas para dar cuerpo al pigmento. Da brillo y buena estabilidad, ya que controla la viscocidad de la pintura (DGDM, 2017).

La lista de los usos químicos del bario abarca más de dos mil aplicaciones industriales específicas, agrupadas en diecisiete clases mayores. Varios componentes manufacturados de bario incluyen carbonato, cloruro, nitrato, óxido, peróxido, hidróxido, sulfito, sulfato y algunas variedades orgánicas ampliamente usadas como reactivos y catalizadores en la refinación de azúcar; calibradores, probadores de agua y probadores contra incendios; en textiles; en medicamentos; en la manufactura de vitaminas, hormonas y coagulantes de sangre; en pirotecnia, especialmente en fuegos verdes; en estabilizadores para pegantes y almidón; en coagulación de caucho sintético; en plaguicidas, insecticidas, herbicidas y germicidas; en endurecimiento de cajas de acero; en lámparas fluorescentes, fosforescencia para vidrio de tubos de TV en blanco y negro; en reactivos para beneficio de minerales y manufactura de papel; en soldaduras; en aditivos para aceite y grasa; en fundición y refinación de magnesio; en recuperación de indio y zinc de la escoria; como escoria preventiva en las industria de cerámica y de ladrillos (Brobst, 1994).

El bario se usa como "ganador" (dioxidante) desgasificador de tubos de vacío de TV y otros. Forma aleaciones con otros metales, como aluminio, magnesio, plomo y calcio. El bario, en un sistema de óxido con itrio y cobre, es de interés en la investigación sobre la superconductividad (Brobst, 1994).

La barita se usa como materia prima para aumentar la densidad de algunos productos en la industria del caucho y del papel, y como relleno en preparaciones de gran densidad. Finamente triturada, mezclada con caucho sintético y asfalto caliente, se utiliza para dar mayor cohesión a los pavimentos de carreteras, pistas de aeropuertos y otras vías; contribuye a formar una capa flexible y hermética que protege la superficie de rodamiento y prolonga la vida del pavimento (Brobst, 1994).

En la industria de pinturas, la barita, preparada con pigmentos blancos, se utiliza en pinturas de alta calidad para vehículos; en pigmento blanco, en mezclas de sulfato de bario, como sulfuro y también como óxido de zinc, se usa para producir el litopón, que es un pigmento de pinturas blancas. El litopón tiene 20 % de sulfato de bario, 30 % de sulfuro de zinc y un poco menos del 3 % de óxido de zinc, y se prepara mezclando las soluciones mediante filtrado por vía húmeda y secado del precipitado para su uso en pinturas.

El blanco fijo (90 %) se emplea en la manufactura de colorantes brillantes. El peso específico es 4.2 gr/cm^3. Con respecto a la finura del producto, puede ser de 200, 325 o 400 mallas. El sulfato de bario, por su gran absorción de rayos X, sirve para cubrir el tubo digestivo en radiografía, para aumentar el contraste. También se usa como componente principal del enlucido y enchape de las paredes de laboratorios de rayos X, para proteger al personal de los efectos nocivos de las radiaciones. El cuerpo humano contiene en promedio 22 mg de bario, de los cuales el 93 % está presente en los huesos. El resto está distribuido en los tejidos blandos en concentraciones muy bajas.

En los últimos tiempos se han intensificado las investigaciones sobre la producción, propiedades y aplicaciones de cristales de titanato de bario. Sus propiedades electromecánicas lo hacen aprovechable en computadoras digitales, cartuchos fonocaptores y muchos aparatos electrónicos y ultrasónicos (Brobst, 1994).

El bario metálico se emplea en la fabricación de ciertas válvulas de radio. La barita es insoluble en agua y ácido, y por lo tanto no es tóxica y permite su uso como material inerte. Como vidriado se usa en alfarería y en vidrio óptico. También participa en compuestos de venenos para ratas.

El cloruro de bario se utiliza en la purificación de sal; en la manufactura de cloruro e hidróxido de sodio, como fundente en aleaciones de manganeso; como ablandador de agua de calderas y en preparaciones medicinales. El nitrato de bario, también llamado *salitre de barita*, se utiliza en pirotecnia y señales luminosas.

Como parte del material fotográfico blanco y negro, hay una base que está cubierta con una sustancia blanca, lisa, resistente a los químicos (barita o sulfato de bario), que se denomina *papel barita*, *papel base de fibra revestida de barita* o *papeles FB* (sigla de *fibra base*). El óxido de bario (barita calcinada) se utiliza como agente de secado en la industria para el endurecimiento de aceros. El clorato de bario se utiliza en pirotecnia. El acetato de bario se usa en la industria como reactivo químico, y el cianuro de bario en metalurgia (Brobst, 1994).

2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales de la barita, tales como la mineralogía y composición, los tipos de depósitos a escala mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales; además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio mundiales de este mineral.

2.1. Características

La barita es un mineral no metálico y pesado. Es un sulfato de bario que se encuentra en asociaciones con la fluorita, calcita, dolomita, rodocrosita, yeso, esfalerita, galena y estibina. Es el mineral más común y abundante de bario. La barita pura contiene 58.8 % de bario (o 65.7 % de óxido de bario y 34.3 % de óxido de azufre). Cristaliza en la clase bipiramidal del sistema ortorrómbico; los cristales son bien formados, generalmente tabulares con tres clivajes, y el más perfecto es paralelo a {001}. La barita puede ser incolora, blanca o gris, y puede variar de transparente a opaca (figura 1).



Figura 1. Barita

Fuente: Servicio Geológico Colombiano.
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

En algunos depósitos es de color negro, amarillo, café, rojo, verde o azul, a causa de las impurezas incluidas. La raya es blanca, y tiene un lustre vítreo a resinoso o perlado. La gravedad específica de la barita pura se calcula en 4.5; las inclusiones e impurezas pueden reducir considerablemente su densidad. Los cristales bien formados son generalmente tabulares y presentan clivaje en tres direcciones. La dureza en la escala de Mohs es de 2.5 a 3.5. Comercialmente los términos *duro* y *blando* se usan para referirse a la facilidad de trituración.

Composición química de un patrón sintético de rayos X:

	Witherita	Barita
Óxido de azufre (SO_3)	34.21	34.30
Óxido de calcio (CaO)	60.05	
Óxido de bario (BaO)	5.35	65.70
Total	99.61	100.00

La witherita, el carbonato natural de bario, contiene 70 % de bario (o 77.7 % de bario y 22.3 de dióxido de carbono); cristaliza en el sistema ortorrómbico; es transparente a opaco; el color es comúnmente blanco, gris, amarillo, café o verde; la fractura es irregular; el lustre es vítreo o resinoso; la dureza es de 3.0 a 3.5 Mohs, y la gravedad específica del mineral se calcula en 4.29. Las estimaciones sobre la abundancia del bario en la corteza terrestre indican que se encuentra en el rango de 300 a 500 ppm. La witherita es un recurso muy utilizado en la producción de químicos de bario, por su solubilidad en ácido (Brobst, 1994).

La sanbornita ($BaSi_2O_5$ silicato de bario) contiene 50 % de bario y es un recurso potencial de bario para usos químicos. Este mineral es soluble en agua, lo que permite recuperar el bario por métodos químicos.

Entre las rocas ígneas, los basaltos contienen aproximadamente 100 ppm de bario, los granitos contienen comúnmente entre 200 y 800 ppm, y las sienitas y algunas rocas ígneas más potásicas contienen entre 3000 y 5000 ppm. En las rocas sedimentarias, los *shales* generalmente contienen la mayor cantidad: 500 a 1000 ppm; las calizas presentan menos de 200 ppm, y en las areniscas, con grandes variaciones, desde pocas partes hasta varios cientos de ppm.

2.2. Mineralogía

Las características principales de la barita son las siguientes (Minerals.net, 2017):

- Formula química: $BaSO_4$.
- Formula variable: (Ba, Sr)SO_4.
- Color: incoloro, blanco, amarillo, anaranjado, rojo, carmelita, azul, gris; a veces multicolor y bandeada.
- Raya: blanca.
- Dureza: 3-3.5.
- Forma cristalina: ortorrómbica, más comúnmente en cristales pegados en pares, que pueden ser muy grandes. También puede aparecer en forma tabular, prismática y de apariencia sedosa y en agregados. Puede presentarse masiva, nodular, fibrosa, estalactítica y en rosetas perfectas.
- Transparencia: transparente a traslúcida en sección delgada.
- Gravedad específica: 4.3 a 4.6.
- Lustre: vítreo a perlado.
- Clivaje: 1.1-basal; 2.1-prismático; 3.1-pinacoidal.
- Fractura: irregular.
- Tenacidad: frágil.
- Otras propiedades: comúnmente fluorescente en una variedad de colores, y algunas veces, fosforescente.
- Otros nombres: barita, espato pesado.
- Variedades: piedra de Bologna que se encuentra de carácter nodular, radial o como barita masiva (Bologna –Italia), y con carácter fosforescente. Rosa de desierto: barita rosetada con inclusiones de arena.
- Grupo: sulfatos; sulfatos anhidros.

La barita se identifica fácilmente por su gran peso, ya que los minerales similares son mucho más livianos. La barita con frecuencia reemplaza otros minerales, y aun reemplaza materiales orgánicos tales como la madera y conchas fósiles. Algunas veces forma montículos tufáceos por deposición de manantiales ricos en barita caliente. Muestras de barita de algunas localidades son carmelitas por inclusiones de arena y muchas se encuentran en rosetas semejantes a flores. La barita es isomorfa con celestina, y puede reemplazarla.

2.3. Geoquímica

El ciclo geoquímico del bario comienza con su arribo a la parte superior de la corteza terrestre, como resultado de la actividad volcánica y el emplazamiento de las intrusiones ígneas.

La barita se presenta en asociación con potasio en rocas ígneas félsicas y acompañadas principalmente de plomo y zinc en menas de sulfuros. Solo una pequeña cantidad de bario forma parte de los minerales de calcio; la mayoría del elemento es atrapado por los minerales de potasio. Debido

a la diferencia de carga entre los iones de bario y potasio, parte considerable del bario es capturado por los minerales de potasio en las etapas tempranas de la cristalización fraccional (Goldschmidt, 1970).

La barita es un mineral que se caracteriza por su alto peso específico; su nombre, se deriva del término *baros,* pesado. Como espato pesado fue mencionado por primera vez por el zapatero Casciorolus de Bolonia, quien observó que calcinándolo con polvo de carbón y barniz adquiría la facultad de fosforecer (piedra fosforescente de Bolonia) en el siglo XVII. En 1774 Sheele con la piedra parda, a partir de la cual obtiene el manganeso, surge un residuo de *espato pesado* que debidamente tratado con oleum de vitriolo, forma un depósito blanco anormalmente pesado, vuelve a ponerse de moda con el nombre de *Baroto*, puesto por un colaborador de Guyton de Morveau, del griego *Baros* y aparece catalogado en la relación de sustancias simples de Lavoisier de 1789, como *Barita* o *tierra pesada* (Grupo Heurema, s.f)

Elaboración del bario metálico: a partir del óxido se utiliza el método de Winkler. Se calienta en un crisol la mezcla de magnesio y óxido de bario. Los vapores de magnesio y bario se condensan en un tubo con una corriente de agua fría. Finalmente se descompone el óxido de bario metálico que se condensa. Las reacciones son las siguientes:

$$Mg + 2BaO = Ba_2O + MgO \qquad Ba_2O = BaO + Ba$$

El primer paso para la preparación de los compuestos de bario es la calcinación de la barita (o baritina) con carbón en un horno rotatorio a una temperatura de 1200 °C. Este proceso reduce el sulfato de bario (insoluble en agua) a sulfuro de bario (ceniza negra), que es soluble en agua. El sulfuro de bario producido se filtra y se remueve el exceso de carbón y las impurezas.

El bario de alta pureza se utiliza en los procesos de tostación, porque el óxido de hierro, la sílice y el aluminio pueden reaccionar con el bario para formar compuestos insolubles. Uno por ciento de hierro puede convertir tanto como el 4 % de sulfato de bario a compuestos insolubles.

Si se añade una solución de sulfato de bario, se precipita una mezcla que contiene 30 % de sulfuro de cinc (ZnS) y 70 % de sulfato de bario ($BaSO_4$). El precipitado se filtra, lava y seca, y finalmente se calcina bajo ciertas condiciones de cuidado; luego se apaga con agua, se seca y se obtiene un pigmento blanco conocido como *litopón*. Se requiere una tonelada de barita para manufacturar una tonelada de litopón, aunque el producto es solamente el 70 % de sulfato de bario (BaSO4). Si se añade sulfato de sodio a la solución de ceniza negra, el sulfato de bario se precipita químicamente puro.

Si el carbonato de sodio se añade a la solución de ceniza, el precipitado es carbonato de bario. El precipitado puede ser filtrado, lavado, secado y molido para usarlo como carbonato, o para convertirlo en otros compuestos de bario. Al calentar el carbonato en presencia de carbón, al medio ambiente, la barita se oxida. El clorato y el nitrato de bario generalmente se preparan por tratamiento del carbonato de bario con los ácidos correspondientes (Brobst, 1994).

Acetato bárico ($Ba(C_2H_3O_2)_2 + H_2O$): se obtiene neutralizando el sulfuro o el carbonato bárico con ácido acético. Forma cristales fácilmente solubles, empleados en tintorería y en estampado de algodón.

Carbonato bárico o witherita ($BaCO_3$): el mineral forma cristales rómbicos brillantes, incoloros, o masas levemente traslúcidas, amarillentas, compactas, de peso específico 4 301. Artificialmente se obtiene por precipitación de una sal de bario soluble con carbonato sódico o amónico, en forma de precipitado fino, blanco fácil de lavar. Ocurre la siguiente reacción:

$$BaSO_4 + K_2CO_3 = BaCO_3 + K_2SO_4$$

Este proceso da un rendimiento de 97 %. se consigue la transformación, pero solo aumenta su cantidad a la mitad Finalmente, si el sacarato bárico producido en gran cantidad en la elaboración de las melazas es descompuesto con ácido carbónico, se obtiene carbonato de bario.

El carbonato bárico sirve para obtener otros compuestos báricos, que se utilizan en la fabricación de ladrillos y objetos de barro. A partir del carbonato de sodio también se obtiene el carbonato de bario, que es soluble en ácido clorhídrico:

$$BaSO_4 + Na_2CO_3 = BaCO_3 + Na_2SO_4$$

Clorato bárico ($Ba(ClO_3)_2 + H_2O$): se obtiene por electrólisis de una solución saturada de cloruro bárico a 70-80°. Se usa en pirotecnia para obtener llamas verdes.

Cloruro de bario ($BaCl_2 + 2H_2O$): se obtiene del espato pesado.

$$BaSO_4 + 4C = BaS + 4CO; \quad BaS + CaCl_2 = BaCl_2 + CaS.$$

La fabricación comprende tres operaciones: 1) fusión, 2) lixiviación, 3) cristalización. También se puede obtener

cloruro bárico de sulfuro bárico bruto, disolviéndolo en ácido clorhídrico.

$$BaS + 2HCl = BaCl_2 + H_2S$$

Cianuro bárico ($Ba(CN)_2$): se forma junto con la cianamida de bario tratando el carburo de bario con nitrógeno a 600-700°. Estas son las reacciones:

$$BaC_2 + 2N = Ba(CN)_2;\ Ba(CN)_2 + N = BaCN_2 + CN$$

Industrialmente se trabaja produciendo al mismo tiempo la formación de carburo bárico y transformándolo en compuestos nitrogenados, calentando a temperatura lo más elevada posible, en corriente de nitrógeno, una mezcla de carbonato bárico u óxido bárico y carbón.

Fluoruro de bario (BaF2): se obtiene de la criolita hirviéndola con solución de hidrato bárico, o por disolución de bicarbonato o hidróxido bárico en ácido fluorhídrico, o por doble reacción entre nitrato bárico y fluoruro sódico. Forma un polvo blanco granulado muy poco soluble en agua; punto de fusión: 1280 °C.

Nitrato de bario ($Ba(NO_3)_2$): se obtiene por incorporación gradual de la cantidad calculada de nitrato sódico en una solución caliente de cloruro de bario. Precipita, y una vez lavado se somete a recristalización.

Nitrito de bario ($Ba(NO_3)_2 + H_2O$): se obtiene del cloruro de bario por doble descomposición con nitrito sódico.

Óxidos de bario: comprende este grupo el óxido de bario (BaO), el hidrato ($Ba(OH)_2$) y el peróxido de bario (BaO_2).

Sulfuro de bario (BaS): calentando sulfato de bario con carbón, es reducido a sulfuro de bario a temperatura relativamente baja. La reacción se verifica a 600-800°, según esta ecuación:

$$BaSO_4 + 2C = BaS + 2CO_2$$

El sulfato de bario químicamente puro se emplea como medio de contraste en radiología clínica.

2.4. Tipo de depósito

El ambiente geológico de la barita es muy variado; se encuentra en casi todos los tipos de rocas sedimentarias, intrusivas y metamórficas. Se encuentra en venas asociadas a fallas y lineamientos regionales a lo largo de cuencas marginales o de *rift*, en presencia de rocas carbonatadas. La barita puede rellenar cavidades kársticas y estructuras de colapso, o también reemplazar otros cuerpos mineralizados. Puede ocupar fisuras formadas por deformaciones mecánicas, zonas de dilatación a lo largo de fallas y pliegues, diaclasas y planos de estratificación, y también puede encontrarse en zonas de cizalla y brechas a lo largo de fallas (Hora, 1996).

La figura 2 muestra seis clases de estructuras geológicas (pliegues y fallas) en las que se observan los diferentes tipos de fisuras, fracturas, etc., más frecuentes en las rocas huéspedes que albergan los fluidos con minerales, entre otros los de bario.

La barita se presenta principalmente en lechos, venas y depósitos detríticos residuales. También se encuentra, aunque con menos frecuencia, asociada con sulfuros metálicos y depósitos de fluorita. En cuanto a recursos de barita en el mundo, los depósitos estratificados son hasta ahora los de mayor importancia, por su volumen y tenor.

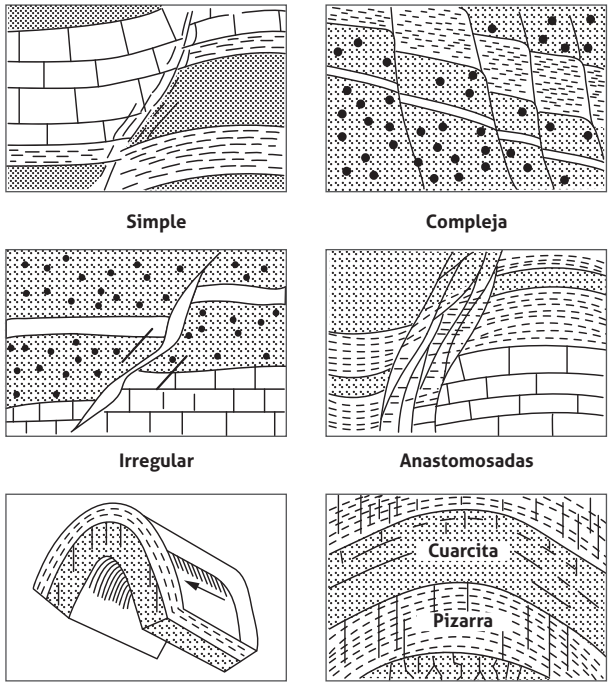


Figura 2. Estructuras geológicas favorables a la formación de depósitos de barita.

Fuente: modificado de Guilbert y Park (1985)

Los principales depósitos conocidos en el mundo se agrupan así: depósitos de fisura y relleno de cavidades, depósitos estratificados y depósitos residuales.

2.5. Depósitos de fisura y relleno de cavidades

Son aquellos en los cuales la barita y los minerales asociados se presentan a lo largo de fallas, fracturas, grietas, planos de estratificación, zonas de brechamiento, canales de disolución y estructuras de colapso. La barita en este tipo de depósitos es densa y de color gris a blanco; los minerales asociados son fluorita, calcita, celestina, dolomita, cuarzo, pirita, calcopirita, galena y esfalerita (figura 3).

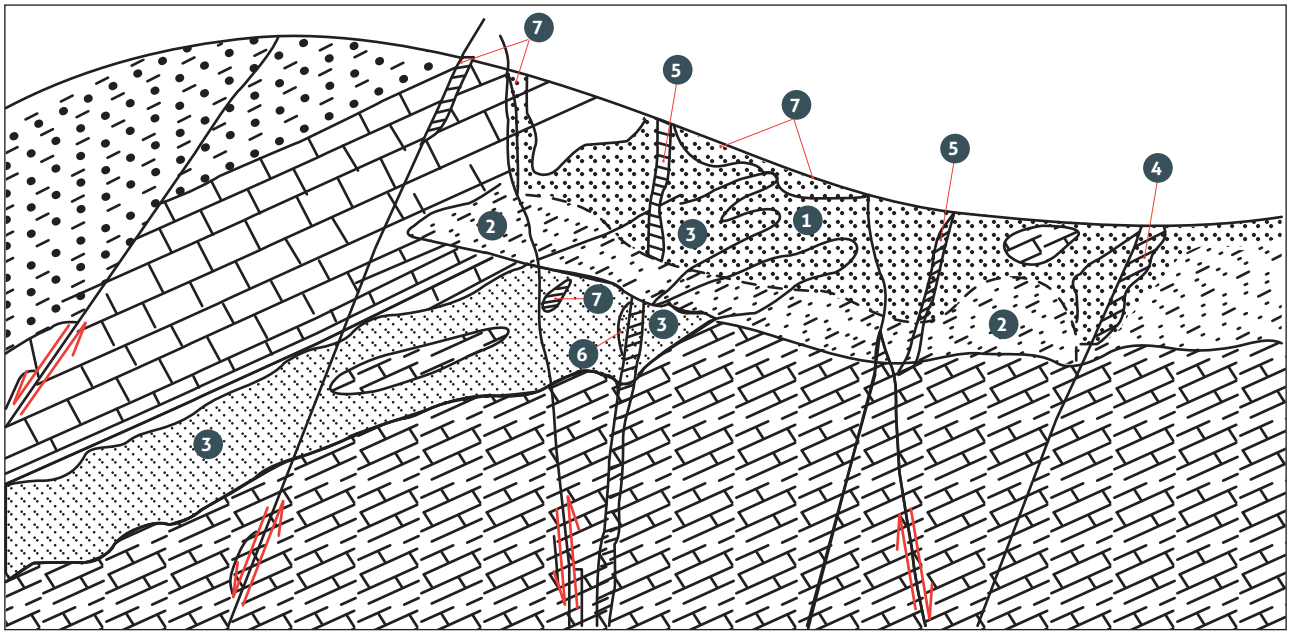


Figura 3. Corte esquemático transversal que ilustra un sistema complejo de fisuras ocupadas por un grupo considerable de minerales 1) zona lixiviada, 2) zona de alteración supergénica tardía, 3) zona mineralizada principal, donde se diferencia la zona inferior no alterada y la superior con oxidación, 4) cuerpos de jasperoide, 5) venas de barita con un patrón de barras horizontales, 6) venas de cuarzo, 7) venas de calcita

Fuente: Guilbert y Park (1985).

La barita y los minerales del tipo de depósitos de fisura y relleno de cavidades son típicos de una serie epitermal, precipitados a partir de soluciones de baja temperatura, y se encajan en cualquier tipo de roca.

La barita puede rellenar cavidades kársticas y estructuras de colapso, o también reemplazar otros cuerpos mineralizados. Puede ocupar fisuras formadas por deformaciones mecánicas, zonas de dilatación a lo largo de fallas y pliegues, diaclasas y planos de estratificación, y también aparecer en zonas de cizalla y brechas a lo largo de fallas (Hora, 1996).

2.5.1. Depósitos estratificados

Son aquellos en los cuales la barita está restringida a ciertos estratos o a una secuencia de estratos, en rocas sedimentarias; los depósitos de este tipo comercialmente importantes son de grano fino, masivos, de color gris oscuro y con abundantes cristales y masas de barita con cuarzo, *chert* y carbonatos tales como calcita, dolomita, siderita, estroncianita y witherita; también son comunes la pirita y los óxidos de hierro.

La barita, en forma de nódulos y rosetas, hace parte sustancial de estas capas y, en menor proporción, de algunas capas limosas y arcillosas. Estas dos estructuras sugieren que durante la depositación existía espacio para un crecimiento libre. Las capas conglomeráticas están constituidas por nódulos y fragmentos de barita, *chert*, apatito y fragmentos de roca en una matriz finogranular de barita (Paradis, Simandl, MacIntyre y Orris, 1999).

Edad de las mineralizaciones: los depósitos aparecen albergados en rocas del Arquiense al Mesozoico, pero son más comunes en rocas del Fanerozoico, especialmente entre el Medio y el Paleozoico Tardío (Paradis *et al.*, 1999).

Acerca del origen de estos depósitos se han planteado dos hipótesis:

- La barita se formó como un depósito sedimentario primario (precipitación)
- Se originó como un reemplazo, en la roca huésped, por una solución acuosa

Es posible que el bario se origine en las rocas carbonatadas, donde el bario puede sustituir la estructura del aragonito en presencia de iones $(S0_4)^{-2}$ y formar barita, lo que explicaría su presencia en rocas carbonatadas, en ambientes de cuencas marinas epicratónicas. Tectónicamente, algunos depósitos están asociados a zonas controladas por fallas sindeposicionales.

Los depósitos sedimentarios por lo general comprenden grupos de lentes u horizontes discontinuos, paralelos a las rocas encajantes. Generalmente presentan gradación, desde el material de más alto tenor cerca al centro de los lentes, a tenores más bajos hacia los extremos. Esta gradación también ocurre estratigráficamente; es decir, el contenido de barita generalmente decrece cerca del contacto con la roca encajante. Los depósitos de venas son generalmente de origen hidrotermal y son más pequeños que los depósitos estratificados. Los depósitos detríticos residuales de barita se forman en capas de arcillas o arcillas residuales, como resultado de la meteorización superficial; normalmente son de bajo tenor (6 a 10 % de sulfato de bario-$BaSO_4$).

Barita estratiforme: la barita estratiforme se deposita formando lentes en sedimentos como roca huésped. Puede tener espesores superiores a diez metros y varios kilómetros de extensión a lo largo del rumbo. También mineralizaciones ricas en barita, con equivalentes laterales a depósitos de plomo-cinc en *shale* como roca huésped (Paradis *et al.*, 1999).

Tectónicamente, se forman en cuencas marinas intracratónicas, en márgenes continentales controlados por fallas; también en estructuras de graben de segundo o tercer orden y cuencas periféricas desarrolladas alrededor de promontorios marinos.

Ambiente de deposición: cuencas marinas profundas y estables, hasta zonas someras. Las rocas ricas en barita (baritina) se depositan en el fondo del mar y comúnmente gradan lateralmente a depósitos de plomo- cinc con *shale* como roca huésped, que se han formado muy cerca de aberturas hidrotermales o *chert* distal, en formaciones de *chert* ferruginoso (hematítico), sílice y sedimentos enriquecidos en manganeso (Paradis *et al.*, 1999).

En cuanto a la edad, los depósitos de barita se albergan en rocas desde el Arquiense hasta el Mesozoico, pero más comúnmente en rocas del Fanerozoico, especialmente en el Paleozoico Medio a Tardío. Los tipos de roca huésped más comunes son carbonatos y silicatos, limolitas, *chert*, arcillolitas, turbiditas, areniscas, dolomitas y calizas.

Modelos de depósitos: algunos depósitos estratiformes de barita se forman de fluidos hidrotermales que se exhalan del fondo marino, y se precipitan la barita y otros minerales (sulfatos, *chert*, etc.) como sedimentos químicos. Dichos sedimentos cambian de composición con la distancia desde el punto de emisión, la temperatura y otros parámetros del fluido hidrotermal, cuando se mezcla con el agua de mar (Paradis *et al.*, 1999). En este tipo de depósitos exhalativos de cinc- plomo (figura 4), los minerales predominantes son barita y witherita, y en menor cantidad aparecen pirita, galena o esfalerita. La barita típica contiene materia orgánica y algo de H_2S e inclusiones fluidas. Presenta textura y estructura estratiforme lenticular de laminar a masiva, con capas de barita nodular o rosetas. La barita presenta características de sedimentación primaria.

2.5.2. Depósitos residuales

La barita se presenta en materiales no consolidados formados por la meteorización de depósitos preexistentes. Es común en el residuo de calizas y dolomitas de edad Cámbrica y Ordoviciana. La mayor parte de la barita de este tipo de depósitos es blanca, entre translúcida y opaca. Los depósitos derivados de las soluciones de canal y de sistemas de venas tienden a ser alargados, y los derivados de estructuras de derrumbamiento y sumideros tienden a ser redondeados. Se presume que la fuente de la barita en estos depósitos sea el material de la vena epigenética que queda después de haberse descompuesto químicamente la roca madre.

La extrema insolubilidad de la barita, si se compara con la de los sulfatos de los otros metales de tierras alcalinas, es factor importante en la geoquímica del bario en soluciones acuosas. La witherita es el carbonato más próximo de la barita, aunque su ocurrencia esté mucho más restringida, controlada por la circulación y precipitación de bario en ausencia de una cantidad equivalente de iones sulfatos (Goldschmidt, 1970).

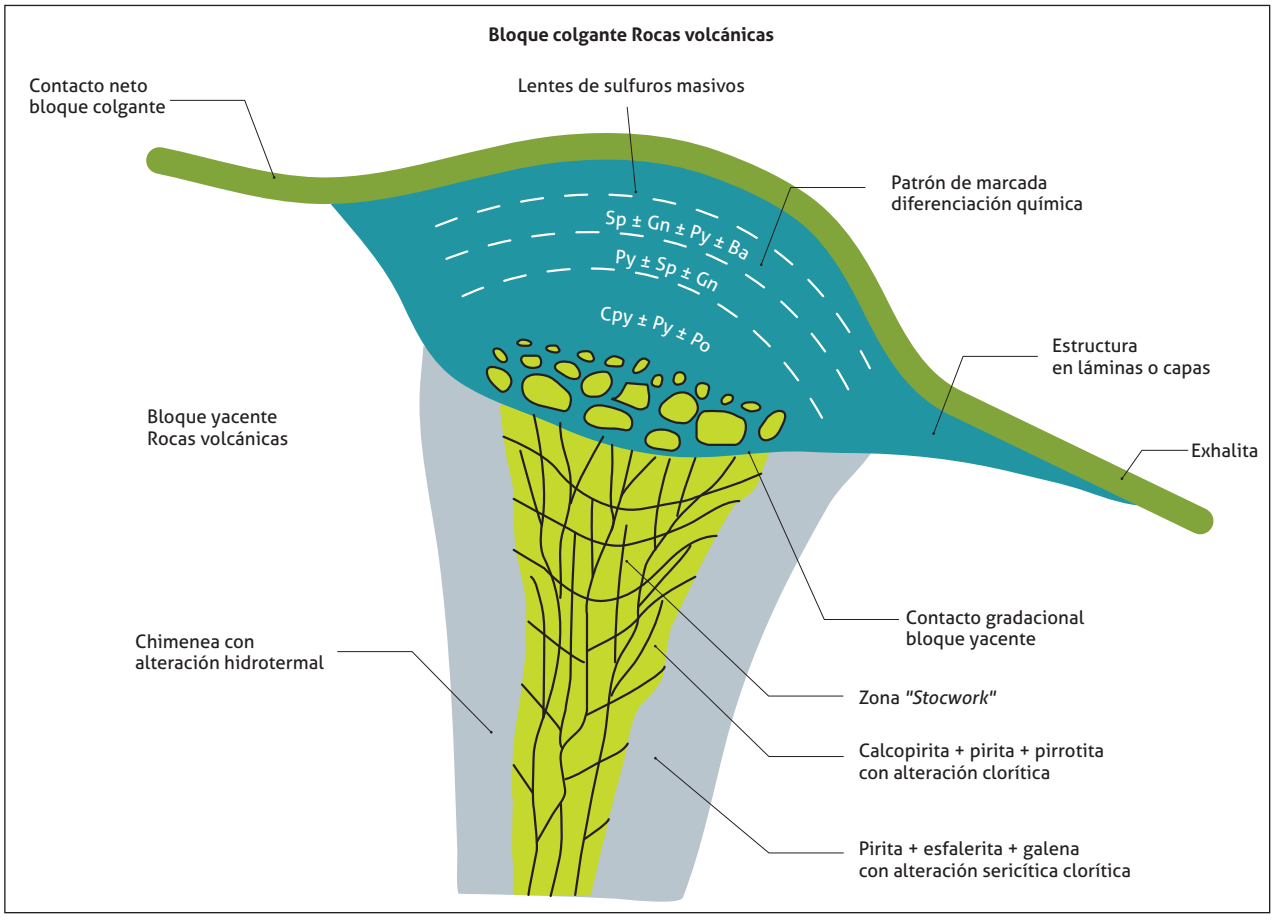


Figura 4. Modelo idealizado de lentes de Sulfuros Volcanogénicos que ilustra las características de zonificación de minerales de menas hipogénicas

(ba, barita; cpy, calcopirita; gn, galena; po, pirrotita; py, pirita; sp, esfalerita)

Fuente: tomado de: Koski (2012), modificado de Lydon (1984).

2.6. Métodos de prospección

La prospección mineral comprende una serie de actividades debidamente programadas y ejecutadas en un orden riguroso previamente establecido. Entre los esquemas conocidos y ampliamente utilizados cabe mencionar el diseñado por las Naciones Unidas, en el que se contemplan cuatro etapas principales para la ejecución de un estudio geológico orientado a identificar un depósito mineral, establecer su continuidad, cantidad y calidad del mineral, de tal forma que defina su importancia y sea una oportunidad de inversión.

Un primer paso, el **reconocimiento**, permite identificar las áreas potenciales en forma regional con base en el estudio de la información geológica regional, el uso de herramientas aerotransportadas de prospección y métodos indirectos de carácter regional. Se realizan reconocimientos de campo que permitan la extrapolación de las interpretaciones geológicas. El objetivo fundamental es identificar las áreas mineralizadas de interés para la realización de estudios adicionales dirigidos a la identificación del depósito mineral. La estimación de las cantidades del material se debe hacer si existe disponibilidad de datos suficientes. Igualmente, si es posible, se deben hacer evaluaciones comparativas con otros depósitos conocidos y de características geológicas similares.

La segunda fase, **prospección**, es el proceso sistemático de búsqueda de un depósito mineral con potencial minero. Los métodos utilizados incluyen la identificación de afloramientos, los contactos geológicos y el uso de métodos indirectos, tales como estudios geofísicos y geoquímicos. Igualmente, se recurre a la apertura de trincheras, se realizan perforaciones y se toman muestras. El objetivo es identificar un depósito como blanco para estudios

de exploración adicionales. La estimación de las cantidades se obtiene con base en la interpretación de los resultados geológicos, geofísicos y geoquímicos.

La **exploración general**, como tercera etapa, implica la delimitación inicial de un depósito identificado. Los métodos utilizados incluyen el muestreo superficial, la apertura de trincheras y perforaciones espaciadas para le evaluación preliminar de la cantidad y calidad del mineral (pruebas mineralógicas a escala de laboratorio, en caso de ser necesario) y la interpolación con base en métodos indirectos de investigación. El objetivo es establecer las características geológicas principales del depósito, indicando razonablemente la continuidad y estimación inicial del tamaño, la forma y magnitud de la estructura. El grado de exactitud debe ser suficiente para decidir si es posible realizar un estudio de prefactibilidad y proceder a una exploración detallada.

La **exploración detallada**, como cuarta etapa, comprende la delimitación tridimensional del depósito (geometría del depósito) a partir de la información obtenida del muestreo de afloramientos, de apiques, perforaciones y apertura de túneles. El espaciamiento del muestreo geoquímico, la forma, su estructura y demás características relevantes del depósito se establecen con un alto grado de exactitud. Se requiere el estudio detallado de las muestras obtenidas. La viabilidad del proyecto se puede determinar con base en la información que aporta el estudio de exploración.

En el caso particular de la barita, la **prospección geoquímica** es quizás el método más efectivo para reconocerla. Por lo general, aparece con anomalías de estroncio y algunas veces con mercurio, plata, plomo, zinc y cobre en suelos y rocas. En sedimentos activos, la barita aparece tanto en las arenas como en los sedimentos finos (Hora, 1996).

La barita clástica en sedimentos activos, en arenas y fracciones de arena muy fina, en materiales superficiales, es un buen indicio para buscar depósitos. Una alta relación bario/estroncio en rocas y suelos, define zonas mineralizadas con cobre/molibdeno (Rose, 1979).

La geofísica es una herramienta útil y se puede utilizar mediante el corrido de líneas gravimétricas, y también por métodos magnéticos, a lo largo de estructuras y conjunto de venas mineralizadas (Hora, 1996).

2.7. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

La mayoría de los depósitos que se explotan en el mundo tienen tenores superiores del 80 % de bario. El tamaño de los depósitos puede variar desde miles hasta tres millones de toneladas.

3.7.1. Extracción de la barita

Los depósitos de barita estratificada se trabajan con los métodos tradicionales de minería (cámaras y pilares) o a tajo abierto. La barita, dependiendo del uso que vaya a dársele, se vende en forma de masa cruda, concentrados y base de barita.

Los depósitos residuales fueron los primeros en explotarse, al principio con sistemas rudimentarios, y posteriormente se adoptaron métodos mecánicos. El material extraído con palas y cargadores es tratado en plantas lavadoras, donde el agua a presión lava la arcilla y los fragmentos de roca y la barita se almacena en un depósito localizado encima de una criba.

Los fragmentos demasiado grandes se seleccionan para triturarlos, pero únicamente si el contenido de barita es alto. La descarga del lavadero pasa a través de un cilindro rotatorio con huecos de aproximadamente una pulgada de diámetro, y los fragmentos de tamaños más grandes se trituran. La barita se separa de los fragmentos de roca por gravedad específica; el hierro puede ser removido magnéticamente. La recuperación de la barita oscila entre 80 y 85 %.

El mineral, una vez extraído de la mina, se somete a procesos de beneficio para mejorar su calidad, para lo cual se siguen diferentes métodos, que se describen a continuación (Brobst, 1994).

3.7.2 Beneficio de la barita

La barita que se extrae de la mina está acompañada de material silíceo (cuarzo, principalmente), así como de cantidades pequeñas de estroncianita (sulfato de estroncio) y carbonato de calcio en pequeñas cantidades. Para mejorar su calidad se debe eliminar la mayor cantidad de cuarzo, con el fin de obtener un concentrado de sulfato de bario y garantizar una densidad mínima de 4.2, necesaria para la elaboración de lodos de perforación que se utilizan en la industria petrolera. Para mejorar su calidad se pueden utilizar estos dos métodos principales:

Proceso gravimétrico en medio acuoso. Consiste en aprovechar la diferencia de densidad entre la barita 4.48 g/cm3 y el cuarzo 2.65 g/cm3 (como máximo), para lo cual se utiliza el sistema de espirales, mesas vibratorias, hidrociclones, etc. (Brobst, 1994) (figura 5).

Flotación. En este otro método utilizado para el beneficio de la barita, el mineral se lleva al molino y la suspensión resultante se pasa a las celdas de flotación. El concentrado de barita es filtrado, secado y calcinado para remover los reactivos. En el proceso intervienen reactivos colectan-

tes; para el caso de la barita, ácidos grasos o sulfanatos de petróleo. La recuperación de la barita, en ambos casos, oscila entre el 85 y el 90 por ciento (Minero, 2017).

Metalurgia. En la industria se preparan pequeñas cantidades por reducción de óxido de bario con aluminio en grandes retortas. El metal se utiliza en aleaciones bario-níquel para alambres de bujía y en el metal de Frary, aleación de plomo, bario y calcio, que puede moldearse.

El metal reacciona con el agua, se oxida con rapidez al aire y forma una película protectora que evita que la reacción continúe; en aire libre puede inflamarse. El metal es bastante activo químicamente para reaccionar con la mayor parte de los no metálicos. El mineral es dúctil y maleable. La barita blanda es fácil de moler; se utiliza en la manufactura de los compuestos de bario. La barita cruda se muele y mezcla con polvo de carbón y se calcina en un horno rotatorio de reducción. El sulfato de bario se reduce a sulfuro de bario o ceniza negra; ésta consta de cerca de 70 % de sulfuro de bario, se trata con agua caliente para hacer una solución que se utiliza en numerosos compuestos (Minero, 2017).

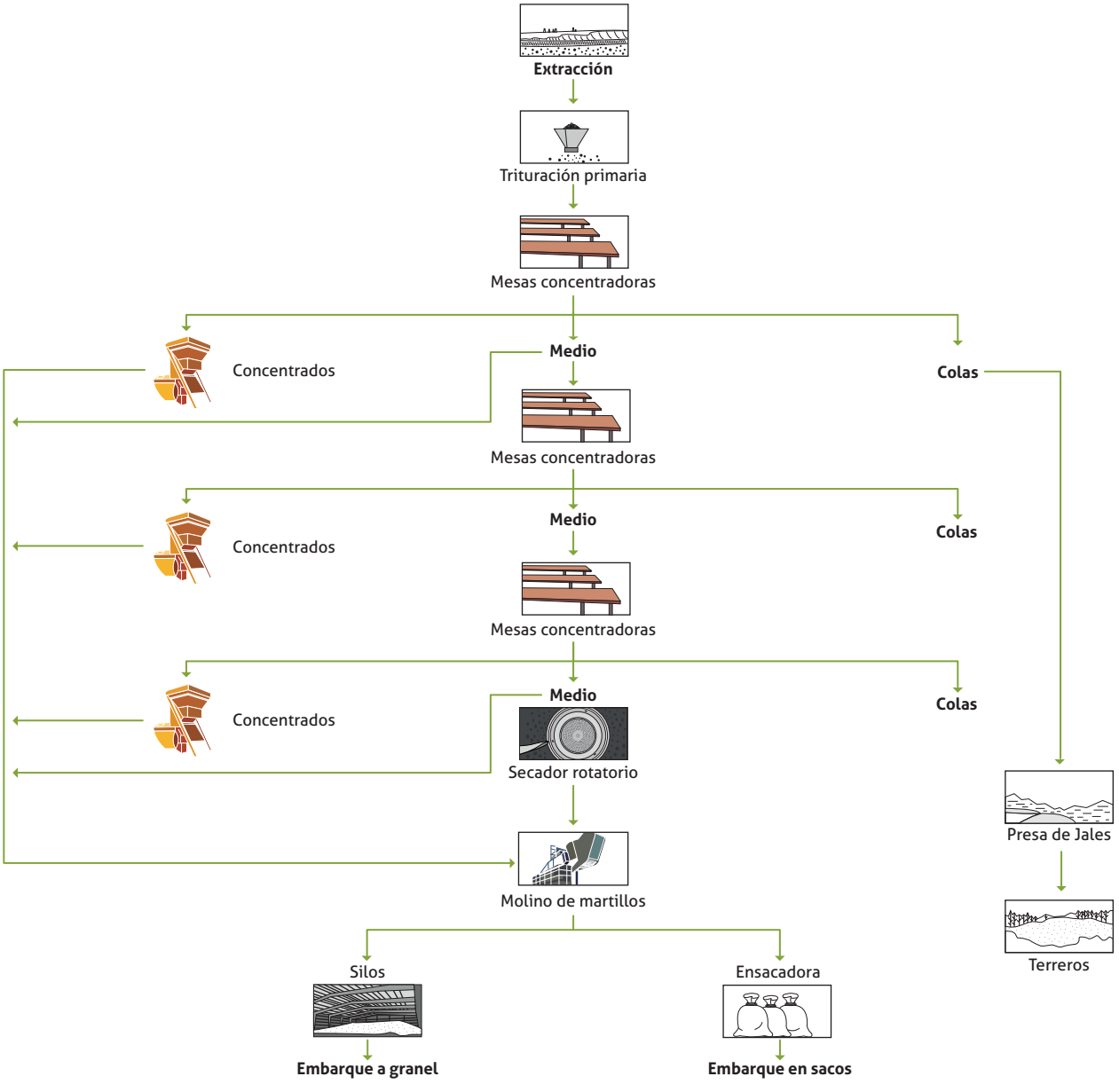


Figura 5. Diagrama de flujo en la concentración de barita

Fuente: modificada a partir de DGDM (2017)

Consideraciones ambientales. La industria de la barita no causa mayores perjuicios ecológicos, fuera de las normales originadas por la minería y el beneficio del mineral. Las plantas de flotación y lavado de barita requieren estanques para almacenar los desechos, por lo general inertes. Las minas a cielo abierto se pueden rehabilitar para otros usos posteriores. Algunos gases tóxicos, especialmente de sulfuro de hidrógeno, son generados por plantas químicas dedicadas a la manufactura de cloruro de bario. Los gases tóxicos se pueden desprender de la descarga, y el sulfuro de hidrógeno es convertido en otros productos sulfurosos.

Por muchos años, en Alaska no se permitía tratar minerales de barita con contenidos superiores a 3 ppm de cadmio y 1 ppm de mercurio. En Estados Unidos, estos estándares fueron pronto aplicados en California y en los estados situados en el golfo de México. Tales regulaciones potenciales se han discutido en varios foros de la Federal Register. Estas normas se pueden encontrar en varias fuentes de barita, pero especialmente de depósitos de barita estratificada, no asociados a depósitos de sulfuros, como los del estado de Nevada. Este estándar, sin embargo, excluye el uso de la barita de muchas venas y depósitos estratiformes que contienen sulfuros metálicos asociados, especialmente con zinc, los cuales comúnmente también contienen cadmio en cantidades mayores de lo usual. Se han propuesto varias reglas que no permiten ninguna descarga de plataformas de perforaciones petroleras dentro de 6.4 km de la costa; pero detrás de estos límites de descarga no es permitido más de 1 ppm para cada uno de los minerales de cadmio y mercurio (Minero, 2017).

Casi ninguna mina de barita se recicla. El residuo de lodos de perforaciones generalmente se abandona en estanques después de haber terminado la perforación. La barita o los compuestos de bario utilizados en varios procesos y productos manufacturados se pierde para usos posteriores (Minero, 2017).

2.8. Recursos, reservas y comercio

La tabla 1 muestra las reservas mundiales en el periodo comprendido entre 1996 y 2016, que se duplicaron hasta alcanzar el orden de 300 millones de toneladas; los cuatro países que hacen los mayores aportes son Kazajistán, Turquía, China e India, con el 65 % del total de reservas en el año 2016. La participación mundial de reservas por países se refleja en la figura 6.

Como se mencionó, este mineral se usa mayoritariamente en lodos de perforaciones petroleras, y también, aunque con menor frecuencia, en perforaciones mineras. Por esta razón, la búsqueda, evaluación y demanda de este mineral están estrechamente relacionadas con los proyectos de exploración de hidrocarburos en el mundo. La tabla 2 muestra los principales países productores de barita en el periodo comprendido entre 1996 y 2016. En la figura 7 se muestra la participación de países en la producción de barita en el año 2016; allí se puede observar que los tres principales países productores son China, India y Marruecos, que suman el 63 % de la producción mundial.

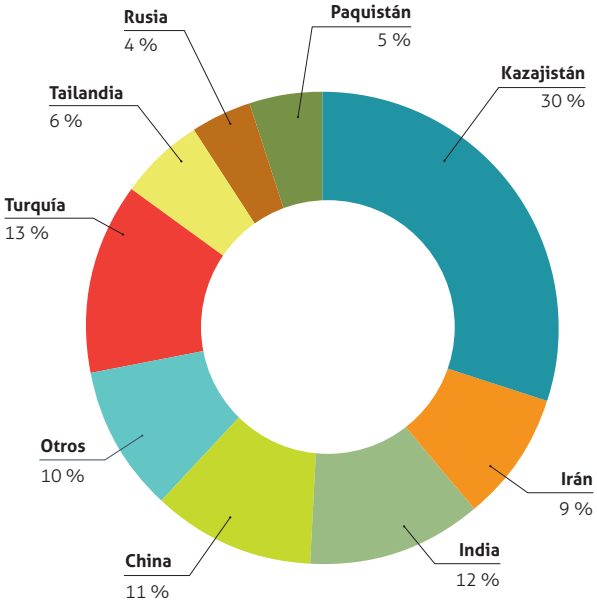


Figura 6. Reservas mundiales de barita en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

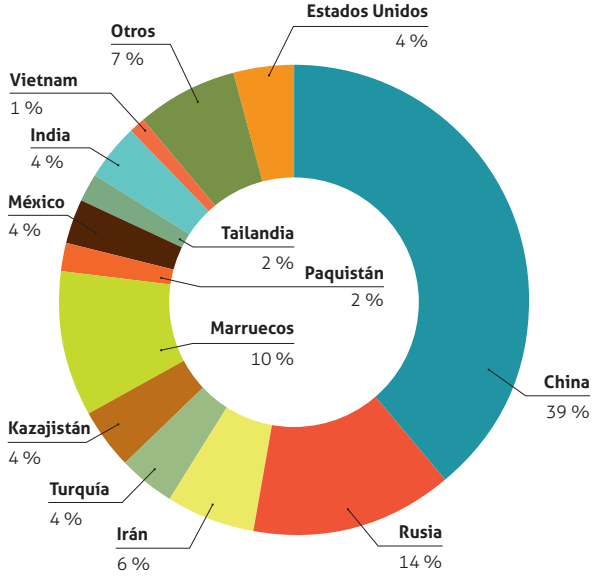


Figura 7. Producción mundial de barita entre 1996 y 2016 (en miles de toneladas)

Fuente: USGS (2017)

Tabla 1. Reservas y recursos mundiales de barita (en miles de toneladas) en el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	28 000	6000	25 000	15 000	
Argelia		9000	9000	29 000	
Brasil			2100		
Bulgaria		10 000			
Canadá	11 000				
China	35 000	30 000	62 000	100 000	30 000
Francia	2000	2000	2000		
Alemania	1000	1000	1000	1000	
India	28 000	53 000	53 000	32 000	32 000
Irán					24 000
Irlanda	1000				
Kazajistán					85 000
Corea del Note					
México	7000	7000	7000	7000	
Marruecos	10 000	10 000	10 000	10 000	
Paquistán				1000	14 000
Rumania					
Rusia		2000	2000	12 000	12 000
Tailandia	9000	9000	9000		18 000
Turquía	4000	4000	4000	4000	35 000
Vietnam					
Reino Unido	100	100	100		
Otros	20 000	12 000	14 000	24 000	29 000
Total	156 100	155 100	200 200	235 000	279 000

Fuente: USGS (2017)

Tabla 2. Producción mundial de barita en el período 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	650	400	540	640	316
Argelia		50	50	60	
Brasil			60		
Bulgaria		120	95		
Canadá	60				
China	1500	3800	4300	4000	2800
Francia	70	75	75		
Alemania	145	120	89	50	
India	550	650	1000	1100	1000
Irán	150	190	280	200	400
Irlanda	60				
Kazajistán	150		120	200	300
Corea del Note		70			
México	230	120	250	154	250
Marruecos	270	320	420	600	700
Paquistán				50	120
Rumania	100				
Rusia		60	65	60	210
Tailandia	50	50	120		170
Turquía	155	120	200	250	250
Vietnam			110	85	100
Reino Unido	80	70	60	50	
Otros	195	250	250	300	520
Total	4415	6465	8084	7799	7136

En miles de toneladas métricas

Fuente: USGS (2017)

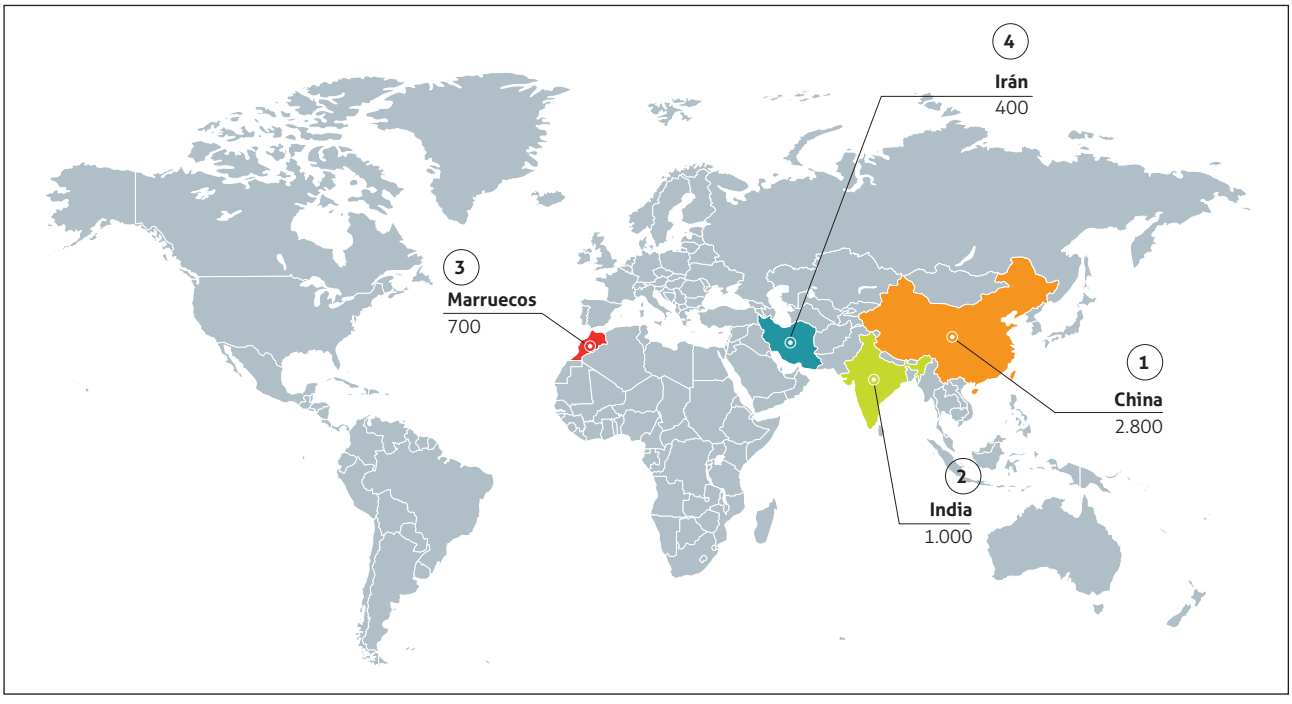


Figura 8. Principales países productores de barita en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

En el mundo, los precios de la barita son muy flexibles y dependen de las especificaciones y cantidades requeridas por el comprador. La mayor parte del producto grado-lodo se vende con los servicios de ingeniería a las grandes compañías de perforación petrolera. Igualmente, los precios varían de acuerdo con la concentración y pureza de los productos, según los requerimientos de la industria. El precio por tonelada varía en un rango situado entre los USD 80-400.

2.9. Perspectivas

En los últimos años, el auge en la producción de gas y petróleo ha motivado un crecimiento constante de la demanda de los diferentes productos de la barita en el mercado internacional. Se espera que para el año 2024, el mercado de Estados Unidos experimente un incremento del 6 % respecto del consumo actual (figura 9).

3. La barita en Colombia

En Colombia, la exploración geológico-minera y explotación de barita no ha tenido un lugar relevante en el contexto económico de materias primas de origen mineral, y por lo tanto su aporte a la economía de los recursos naturales no renovables no ha tenido mayor importancia. Sin embargo, la geología del país y las numerosas ocurrencias conocidas permiten pensar que existe un potencial geológico-minero considerable. Además, existe la posibilidad de encontrar depósitos de tipo sedimentario donde se presenten rocas afines con este tipo de ambiente. Según Gómez *et al.*, (2006), en Colombia las mejores posibilidades aparecen en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana.

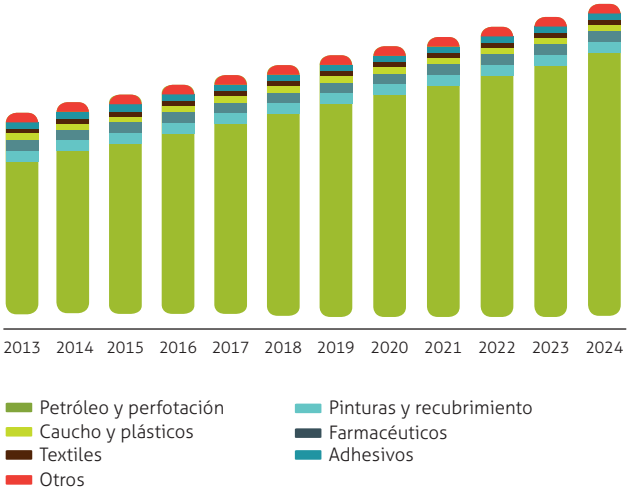


Figura 9. Consumo de barita estimado para el periodo 2013-2024 en Estados Unidos

Fuente: Global Market Insight (2017)

3.1. Geología regional

En el país, las minas y manifestaciones más importantes se ubican en dos sectores de la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana: el primero comprende los departamentos de Norte de Santander, Santander y Cesar, y el segundo, los departamentos de Huila y Tolima. En Norte de Santander, las existencias se concentran en los municipios de Ábrego, Hacarí, El Carmen y Villa Caro, las manifestaciones son de origen hidrotermal, se encuentran emplazadas en rocas graníticas jurásicas y metamórficas de edad paleozoica; en Santander las ocurrencias están en los municipios de La Paz, La Belleza, Bolívar, Sucre, La Aguada, Barichara, Los Santos, Guaca, Charta, Cepitá, Girón, Umpalá, Santa Bárbara, Tona y Matanzas; en el Tolima, en los municipios de Ataco, Planadas, Coyaima, Natagaima, Rovira, Valle de San Juan; en el Huila, en los municipios de Nátaga, Tesalia, Palermo, El Pital, Paicol y Aipe. Igualmente, existen manifestaciones aisladas y poco conocidas, como las del departamento de La Guajira (Camacho, 2002).

3.2. Geología local

La información geológica de algunas minas señala que las mineralizaciones de barita se originaron a partir de procesos hidrotermales encajados en diferentes tipos de rocas huéspedes, especialmente volcánicos, ígneos y calizas.

Las mineralizaciones se localizan especialmente en la subprovincia Santander Perijá y subprovincia Ibagué Mocoa, en la Provincia Metalogénica Continental Central (Salinas *et al.*, 1999).

La situación actual de las principales áreas con barita es la siguiente:

Departamento de Santander. Las mineralizaciones más importantes de barita se encuentran en forma de venas y filones en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, por lo regular asociadas con fluorita y minerales de plomo, que algunas veces se explotan como subproductos. La barita se presenta con diferente grado de pureza, cristalinidad y peso específico (Royero, 2001).

En la Mesa de los Santos, los filones de barita se encuentran comúnmente cortando sedimentos. Los estudios de secciones delgadas realizados en muestras de biomicritas de la formación Rosablanca no mostraron indicios de percolación sedimentaria, como tampoco de removilización diagenética de mineral de bario. Se encontraron indicios de la presencia de una misma asociación mineral de la barita y la fluorita. El estudio tectónico de elementos estructurales a pequeña escala muestra que las mineralizaciones están asociadas a fallas menores de rumbo con direcciones E-W y NW-SE (Williams, 1982).

Con respecto a la magnitud de las mineralizaciones típicas en el departamento de Santander, en términos generales se trata de filones de un kilómetro de longitud sobre diques cuyo espesor fluctúa entre 0.40 y 1.20 metros, con una diferencia de altura de 80 metros.

Departamento del Tolima. Las ocurrencias de barita se encuentran, en el sur, en los municipios de Ataco, Planadas, Coyaima y Natagaima; en la zona central, en Rovira y Valle de San Juan, donde se han explotado pequeños yacimientos asociados a rocas volcano-sedimentarias de la formación Saldaña. Las mineralizaciones son de rellenos de cavidades, posiblemente originadas por fluidos hidrotermales de baritina, cuarzo y minerales accesorios. Se trata de áreas de potencial importancia para estudios detallados de exploración y evaluación mineral (Núñez, 2001).

Departamento del Huila. Las mineralizaciones de barita son de origen hidrotermal, por relleno de cavidades, asociadas con rocas ígneas y sedimentarias de edad Jurásico. La mineralización es de edad pre-Cretáceo superior, porque los filones de barita llegan solamente hasta la superficie discordante sobre la que reposan las secuencias sedimentarias cretácicas. Finalmente, se concluye que las rocas de la formación post-Payandé son huéspedes de las mineralizaciones (Vargas, 2011).

3.3. Situación actual de la minería

Con respecto a la barita, el catastro minero reporta que actualmente hay quince títulos vigentes para este mineral.

3.3.1. Potencial

Con base en la información geológica disponible, descrita en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (Gómez *et al.*, 2006), así como los datos de las minas localizadas en el *Mapa metalogénico de Colombia* (1999), existen numerosas localidades con manifestaciones de barita en el país. Una actividad importante es prospectar depósitos de origen sedimentario, con base en el conocimiento geológico disponible sobre los ambientes geológicos, e incluir también interpretaciones de depósitos similares en diferentes países del mundo.

En la forma como se expuso en los párrafos anteriores, la información geológica disponible sobre el país mues-

tra una gran variedad de ambientes geológicos, muchos de ellos propicios para el hallazgo de depósitos de barita, especialmente en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (Gómez *et al.*, 2006).

Teniendo en cuenta que la producción nacional no satisface la demanda interna de este producto, así como de posibles incrementos originados por la continuidad de los trabajos de exploración petrolera en el futuro, se espera que el consumo crezca, lo que justificaría la realización de trabajos exploratorios orientados al desarrollo de nuevos prospectos. De esta forma se podrían incrementar los volúmenes de producción.

Las manifestaciones y yacimientos se registran en la tabla 3- figura 10, extraída del informe *Mapa metalogénico de Colombia* (Salinas *et al.*, 1999). Igualmente, de acuerdo con el mismo informe, solamente de siete de las minas se dispone de información sobre la génesis, y se agrega que se trata de procesos hidrotermales mediante los cuales se formaron los depósitos de barita, especialmente de sulfatos lenticulares, venas y filones.

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el Mapa Metalogénico de Colombia que muestra la distribución espacial y temporal de depósitos y ocurrencias o manifestaciones minerales en un contexto geológico, en la figura 10 se evidencia la información validada a la fecha (SGC, 2016b), así mismo el mapa de Zonas potenciales de recursos minerales en el año 2011.

En la figura 11 el Atlas Geoquímico de Colombia, 2016, a partir de un cubrimiento aproximado del 35% del país muestra la distribución del bario basado en su concentración en sedimentos mg/kg de 26 416 registros analizados (SGC, 2016a).

En el año 2017, la Agencia Nacional Minera reportó una producción de barita de 795.57 toneladas en La Paz, departamento de Santander (Agencia Macional de Minería, 2018).

Tabla 3. Manifestaciones y yacimientos de barita y bario en Colombia

Localidad	Manifestaciones y yacimientos
1	Sulfatos de origen hidrotermal
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	concentración residual
21	
22	
23	

Fuente: Salinas *et al.* (1999)

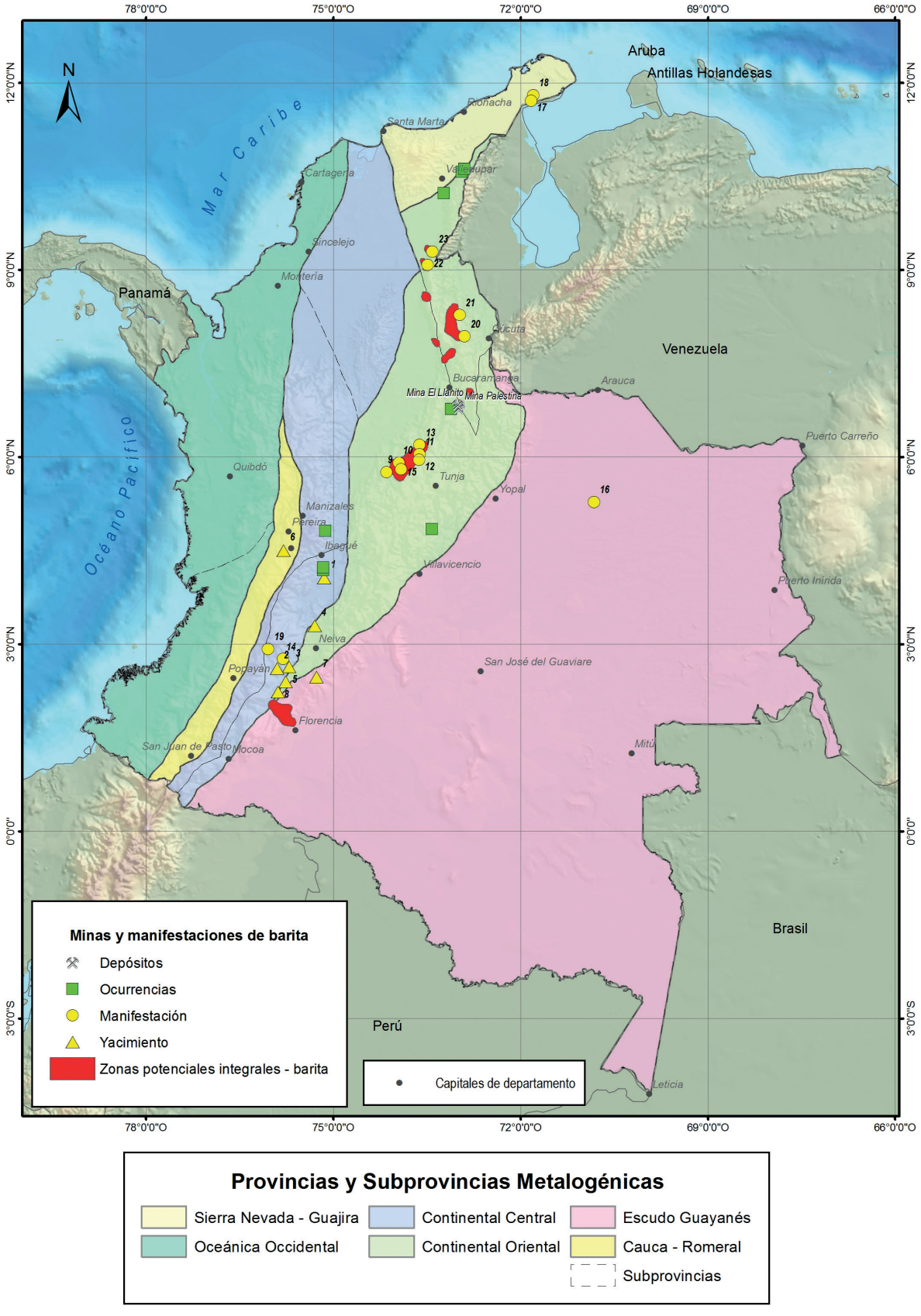


Figura 10. La barita en Colombia

Fuente: Manifestaciones y yacimientos (tabla 3); depósitos y ocurrencias (SGC, 2016b); zonas potenciales integrales (SGC, 2011).

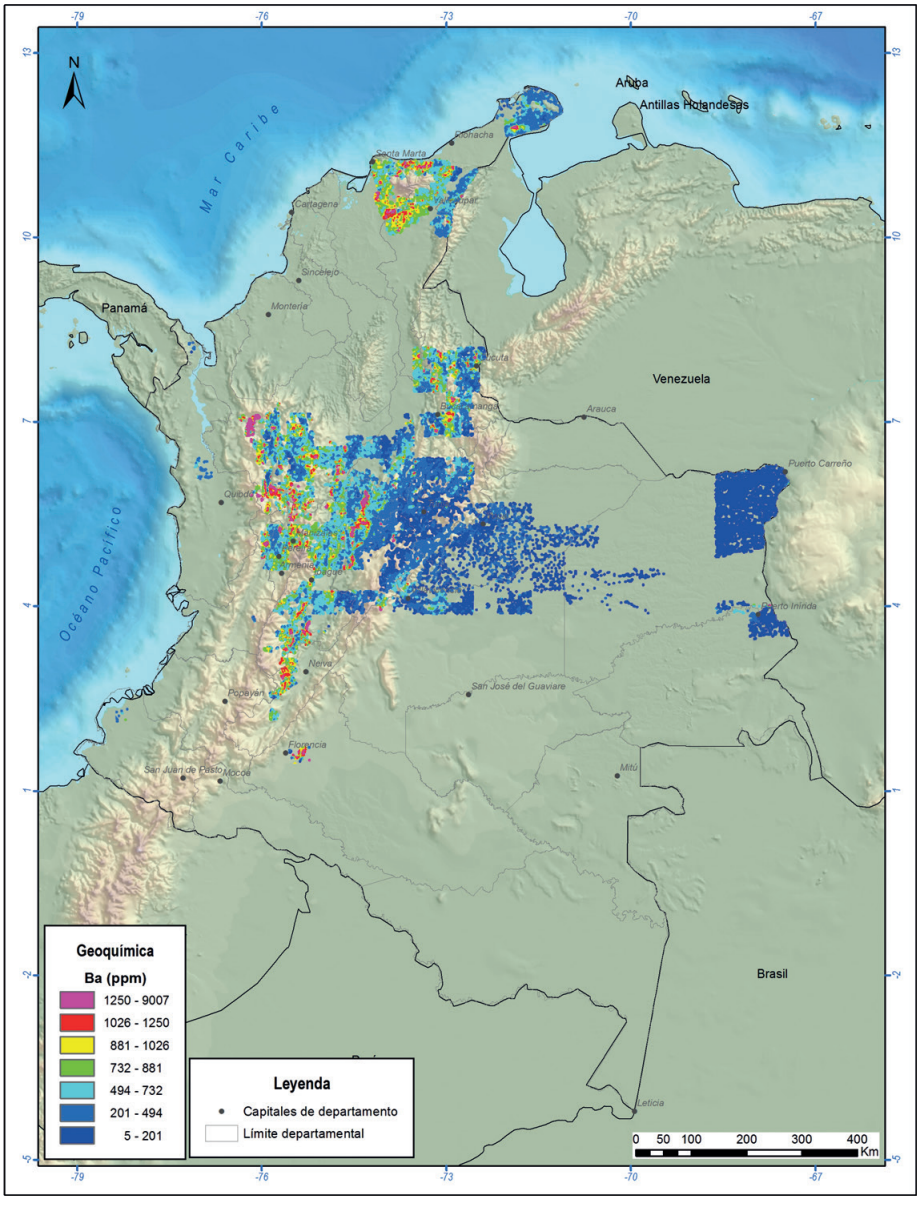


Figura 11. Distribución geoquímica de bario en Colombia

Fuente: SGC (2016a)

3.3.2. Comercio

Con respecto al comercio exterior, los actuales volúmenes de producción no satisfacen la demanda nacional, y por esta razón se mantienen las importaciones, especialmente de Estados Unidos, China y Perú. La Figura 12 muestra las importaciones y su valor en dólares.

4. Aspectos ambientales y sustitutos

En el mercado de los lodos de perforación hay varios sustitos de la barita, como la celestita, ilmenita y hematita sintética (fabricada en Alemania); sin embargo, ninguno tiene mayor impacto en la industria de los lodos de perforación.

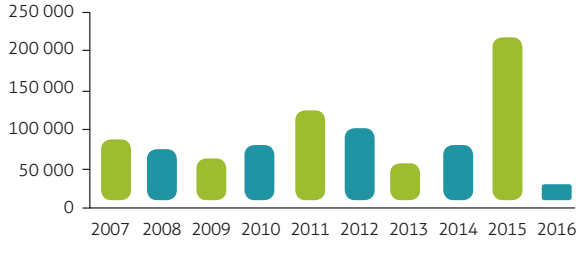


Figura 12. Importaciones de barita entre 2007 y 2016

Fuente: DANE (s.f).

Bibliografía

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.

American Petroleum Institute. (1993) Specification for Drilling Fluids – Specifications and Testing. En *Purchasing Guidelines Handbook*. Washington.

Bariblock (s.f). *La barita*. Disponible en https://www.bariblock.eu/la-barita/

Brobst, D.A. (1994): Barium Minerals, En D. D. Carr (Ed.), *Industrial Minerals and Rocks*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Camacho, J. (2002). *Memoria explicativa. Mapa de recursos minerales de Colombia: minerales industriales*. Bogotá: Ingeominas.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (s.f). *Importaciones.* Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones

Dirección General del Desarrollo Minero. (2017). *Perfil de mercado de la Barita*. Mexico. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287792/Perfil_Barita_2017.pdf

Durán, S. y Teherán, K. (s. f.). *Yacimientos de sulfuros masivos vulcanogénicos (MVS)*. Disponible en http://studylib.es/doc/3343792/yacimientos-de-sulfuros-masivos-vulcanogenicos.

Global Market Insight (2017). *Industry trends*. Disponible en https://www.gminsights.com/industry-analysis/barite-market.

Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al*. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas.

Goldschmidt, V. (1970). *Geochemistry*. Oxford: Clarendon Press.

Grupo Heurema. (s.f). *Lo extraño de una piedra blanca y pesada: El bario*. Disponible en: http://www.heurema.com/Origenes31.htm

Guilbert, J. y Park, J. (1985). *The geology of ore deposits*. New York: Fremman and Company.

Hora, Z. (1996). Vein Barite. En *Selected British Columbia Mineral Deposit* (vol. 2). Ontario: British Columbia Geological Survey

Koski, R. (2012). *Hypogene Ore Characteristics. Volcanogenic Massive Sulfide Ocurrence Model*. Scientific Investigations. Report 2010-5070-C. Virginia: USGS.

Minerals.net. (2017). *The mineral Barite*. Disponible en http://www.minerals.net/mineral/barite.aspx.

Núñez, A. (2001). *Mapa geológico del departamento del Tolima. Memoria explicativa. inf 2195b*. Bogotá: Ingeominas.

Paradis, S., Simandl, G., Maclntyre D. y Orris, G. (1999). *Sedimentary-hosted, stratiform barite* (vol. 3). British Columbia: Geological Survey of Canada.

Rose, A. (1979). *Geochemistry exploration*. New York: Academic Press.

Royero, J. (2001). *Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas.

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

Searls, J. (2002). *Barite. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook*. Reston: U. S Geological Survey.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2011). *Mapa de zonas potenciales integrales para recursos minerales. Esc: 1: 1 000 000*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016a). *Atlas Geoquímico de Colombia. Concentración de Bario (Ba)*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016b). *Mapa Metalogénico de Colombia. Esc: 1: 1 500 000*. Bogotá.

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

USGS (2017). *Barite: Statics and information*. Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/barite/.

Vargas, R. (2011). *Yacimientos minerales del departamento del Huila*. Disponible en http://ingenieria.usco.edu.co/museo/images/GeoEconomicaHuila.pdf.

Williams, J. (1982). *Barita y fluorita en la Mesa de los Santos y Pescadero, Santander. Informe 1881*. Bucaramanga: Ingeominas.



Granate variedad Grosularia
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Granate

Rodolfo Gilart González y René F. Lugo Primelles

Citación: Gilart, R. y Lugo, R. (2019). Granate. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El nombre granate viene del latín *granatus*, que significa *granado*. Cristaliza en el sistema cúbico, presenta dureza de 6 ½ a 7 ½ en la escala de Mohs; de allí que uno de sus usos frecuentes sea el de abrasivo. Sus variedades principales se diferencian en función de su color, así: piropo (rojo intenso a casi negro), almandino (rojo oscuro transparente), espesartina (castaño a rojo), grosularia (verde claro), andradita (amarillo), uvarovita (verde esmeralda) e hidrogrosularía (Hurlbut y Klein, 1984).

El yacimiento más característico del granate lo constituyen los esquistos micáceos, esquistos de hornblenda y neises. El piropo se encuentra en rocas ultrabásicas como las peridotitas. El almandino es un granate común en las rocas metamórficas que resulta del metamorfismo de sedimentos arcillosos; es un granate detrítico disperso en las rocas sedimentarias (Phillips y Phillips, 1986).

Un factor importante que favorece su explotación es el contraste de densidad entre el granate y el resto de minerales que componen la roca, que suele permitir una separación mineralúrgica de bajo costo. El primer uso documentado en los procesos industriales se puede remontar a los últimos años del siglo XIX, cuando Barton Mines Corp. lo utilizó como capa para el papel de lija.

1. Usos

El granate se considera una de las gemas más versátiles del mercado mundial. Su empleo se puede remontar a los tiempos antiguos, particularmente la edad de bronce, cuando fue utilizado sobre todo como un abrasivo y piedra preciosa.

Sus propiedades naturales hacen que sea el más eficiente abrasivo en muchas aplicaciones industriales. Para este fin son muy útiles sobre todo cuando se presentan en formas cristalinas relativamente grandes, y no los que se hallan en masas granulares.

Actualmente las aplicaciones del granate están relacionadas con sus propiedades: dureza y densidad relativamente altas, resistencia química y no toxicidad, que permiten que tenga cinco campos principales de aplicación: abrasivo para eliminación de óxidos sobre superficies metálicas (decapar), revestimientos, filtrado de aguas, corte de acero en *jets* (chorro de agua a alta presión) y pulido.

Según el (USGS, 2006), aproximadamente el 35 % del granate comercializado se utiliza para el pulido de superficie (*sandblasting*), alrededor del 30 % se utiliza en corte de acero en *jets* (chorros), el 15 % en el filtrado de agua, 10 % en la fabricación de polvos abrasivos y 10 % en otros usos.

Se utiliza en polvo aglomerado sobre papel o tela para el pulido y acabado de superficies de materiales como madera, caucho y plásticos; en granos y polvos se emplea para pulir vidrio, cerámica y otros materiales. También se utiliza mediante chorros de arena a gran velocidad (*sandblasting*) para acondicionar superficies metálicas, y mediante chorros de agua a alta presión (*water-jet*), para cortar de metales.

Existen muchos usos industriales adicionales del granate, como, por ejemplo, el de acondicionar el aluminio y otros metales empleados en la aeronáutica y otros equipos de transporte; pulido de lentes ópticas; pulimento y acabado de productos de caucho duro, plásticos y maderas. La industria petrolera de Estados Unidos también usa el granate, en su caso, para limpiar las tuberías de perforación de pozos. Dado que el granate es químicamente inerte y reciclable, resulta un medio ideal para la filtración.

Los granates, además, son minerales frecuentemente utilizados en joyería, pues se los considera gemas, sobre todo los ejemplares rojos, a los que la cultura popular suele atribuirles virtudes mágicas. Si son de buen tamaño y están bien cristalizados, se emplean como piedras semipreciosas.

2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del granate, tales como la mineralogía y composición, tipos

de depósitos existentes en el mundo, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales; además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio de este mineral a escala mundial.

2.1. Características

A continuación se describen las características más importantes del granate.

2.1.1. Geoquímica

El grupo de los granates se identifica mediante la fórmula general $X_3Y_2(SiO_4)_3$, donde X es normalmente calcio (II), manganeso (II) o hierro (II) y Y es aluminio (III), cromo (III) o hierro (III). Hay distintos tipos de granates (piropo, almandino, grosularia, andradita, espesartita y uvarovita), que en la naturaleza suelen aparecer casi todos juntos, en distintas proporciones.

2.1.2. Mineralogía

El granate pertenece a un grupo de minerales que presentan cristales en forma de dodecaedros o trapezoedros. Pertenecen a los neosilicatos, cristalizan en el sistema cúbico, de ordinario en rombododecaedros, hexaoctaedros o combinaciones de ambos (figura 1).

Las distintas variedades de granate muestran casi todos los colores, excepto el azul. Las piedras de color castaño, rojas, verdes, amarillas, negras e incoloras son comunes. Algunos son de un color tan intenso que casi parecen negros, hasta el punto de que a veces se tallan con la parte trasera ahuecada para permitir el paso de la luz. Entre las variedades de granates más comunes se encuentran los siguientes:

- Alumínicos: grosularia, piropo, almandino, espesartita
- Férricos: andradita
- Crómicos: uvarovita



Figura 1. Granate de la variedad grosularita

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Fotografía: Diego Fernando Serrano, SGC

2.1.2.1. Granates alumínicos

Grosularia ($3CaO.Al_2O_3.3SiO_{12}$). Es un silicato de calcio y aluminio, raya de color blanco, brillo vítreo a resinoso; dureza en la escala de Mohs: 7. Es uno de los granates más comunes. Es claro o incoloro, y suele encontrarse en tonos de verde, rojo, amarillo o castaño; su presencia se explica por metamorfismo regional y contacto de rocas calcáreas; está asociado con idocrasa, diópsido, wollastonita, epidota, calcita.

Piropo ($3MgO.Al_2O_3.3SiO_{12}$). Es un silicato de aluminio y magnesio, raya de color blanco, brillo vítreo; mineral de color rojo oscuro a casi negro; dureza: 7.5. En estado puro es incoloro; la presencia de cromo le proporciona tonos rojos fuertes, que el hierro vuelve morados. El más apreciado es el rojo carmín. Su registro se constata en rocas ígneas ultrabásicas (peridotitas y kimberlitas); aparece asociado con diamante, serpentina, olivino, piroxeno y espinela.

Almandino ($3FeO.\ Al_2O_3.\ 3SiO_{12}$). Es un silicato de aluminio y hierro; raya de color blanco; brillo vítreo a resinoso; dureza de 7.5; densidad de 4.32. Es un mineral de amplia distribución. Aparece en tonos que van desde el rojo oscuro hasta el negro. Algunas muestras tienen un matiz violeta; su existencia se verifica en esquistos micáceos, granitos y rocas silíceas con metamorfismo de contacto; aparece asociado con andalucita, cianita, estaurolita, sillimanita. A causa de su dureza se encuentra frecuentemente en los depósitos aluviales. Es el más duro de los granates, y por ello es muy utilizado como abrasivo.

Espesartita ($3MnO.\ Al_2O_3.\ 3SiO_{12}$). Es un silicato de aluminio y manganeso, donde este último puede ser sustituido por hierro; dureza: 7. No es una gema estimada debido a su color castaño, aunque en ocasiones tiene matices rojos a casi negros; su registro está relacionado con pegmatitas, granitos y grupos ricos en manganeso; se encuentra asociado con minerales como cuarzo, turmalina, topacio, rodonita y esfalerita.

2.1.2.2. Granates férricos

Andradita ($3CaO.Fe_2O_3.3SiO_{12}$). Es un silicato de calcio y hierro muy variado; raya blanca, brillo vítreo; dureza de 6.5-7. Es un tipo de granate que varía mucho en composición y color. Uno puede ser opaco y negro (melanita) y otro transparente amarillo, verdoso, pardo; su ocurrencia es en calizas con metamorfismo de contacto; sienitas, rocas serpentinizadas, y esquistos cloríticos. Asociado con hedenbergita, magnetita, nefelina, y leucita. Usos: como gema y abrasivos.

2.1.2.3. Granates crómicos

Uvarovita ($Ca_3Cr_2\ (SiO_4)_3$). Es un silicato de calcio y cromo que se presenta en pequeños cristales isométricos; raya de color verde, brillo vítreo; entre transparente y translúcido; color verde esmeralda a verde oscuro; dureza: 6.5 en la escala Mohs; su existencia se verifica fundamentalmente en depósitos de cromo; se encuentra asociado con cromita y serpentina.

2.2. Tipo de depósito

Los depósitos de granate se encuentran en una variedad amplia de rocas, particularmente de gneises y de esquistos. El granate también se encuentra como depósitos al entrar en contacto con rocas metamórficas, calizas, pegmatitas y serpentinitas. Además, el granate de aluvión está presente en muchos depósitos de arena y de grava de minerales pesados existentes en todas partes del mundo.

Según Smirnov (1982), se conocen dos tipos de depósitos comerciales de granate: primarios y secundarios. Los primarios pertenecen al tipo de yacimientos denominados *metamorfógenos*, y son producto del metamorfismo regional, de facies anfibolita y granulita; los secundarios son acumulaciones de arenas y gravas derivadas de la meteorización química y mecánica de las rocas granatíferas.

Entre los depósitos de granate primario de mayor importancia comercial se encuentran los que han sido clasificados (Rayo, 1998), como *skarns de granate* (modelo de depósito K08 BCGS). Según este modelo, el granate se encuentra en las rocas calcáreas cerca de un contacto intrusivo, y la forma del depósito se puede controlar en parte por la morfología y las condiciones estructurales de las unidades originales.

En la figura 2 se puede observar un esquema de *skarn* donde pueden asentarse granates.

La mineralización del depósito incluye abundante magnetita masiva de grano grueso, wollastonita y granate (grosularita y andradita). En general, estos depósitos tienen muy poco o nada de sulfuros. Es la llamada *zona de exoskarn* de los depósitos metálicos de este tipo.

En general, en estos depósitos, como guías de exploración se establece la posible existencia de anomalías geoquímicas muy débiles de wolframio, zinc y cobre, así como en la geofísica la posible existencia de anomalías de gravedad y magnéticas.

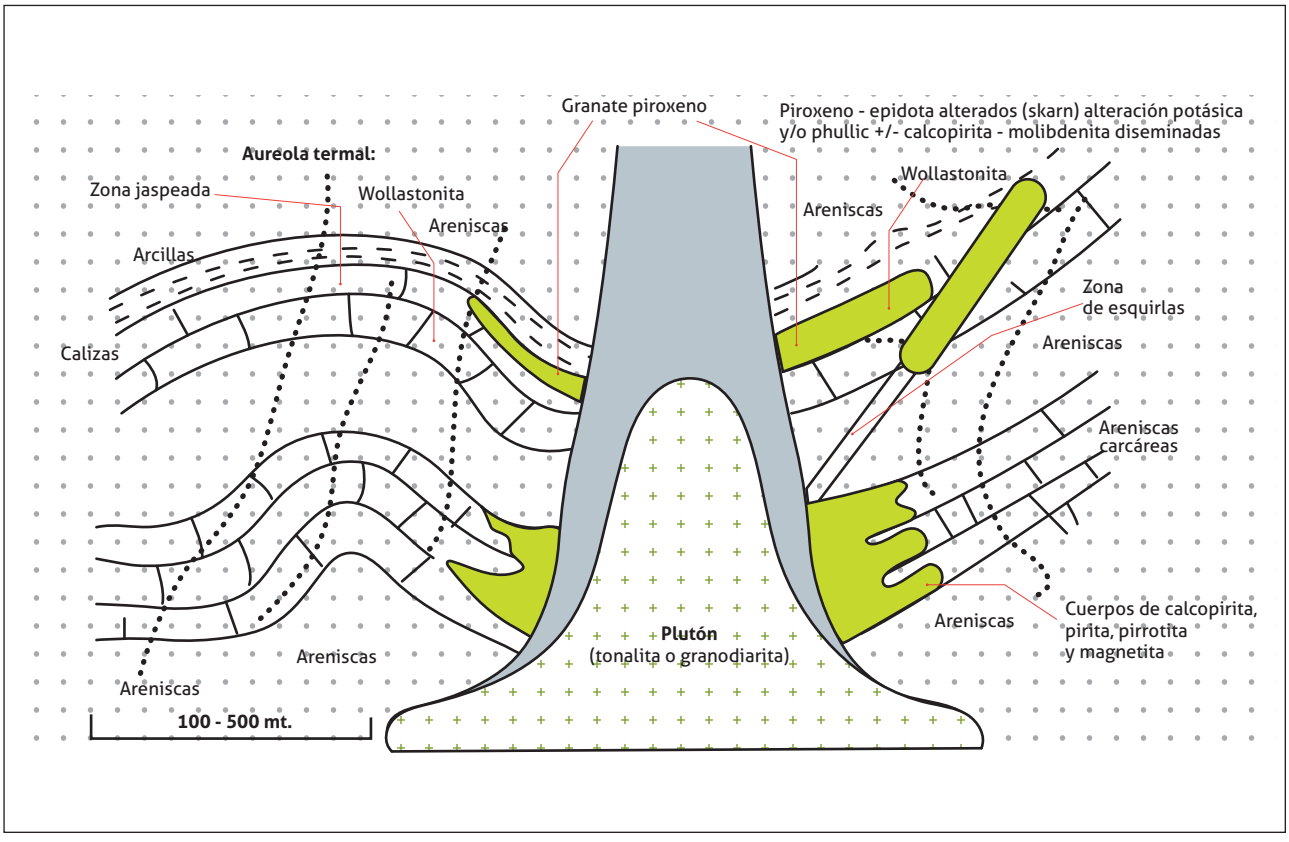


Figura 2. Esquema de *skarn* que muestra las relaciones entre zonas metamórficas de contacto, zonas de mena e intrusión ígnea

Fuente: Modificado a partir de Cox y Singer (2002)



Figura 3. Recursos de granate en el mundo

Fuente: USGS (2017)

Los factores económicos indican que los depósitos deben ser de peso mayor de 20 000 toneladas y contenido de granates superior al 70 %. El granate debe, además, estar libre de inclusiones, contar con una relativamente alta gravedad específica, alta oblicuidad y presentarse en forma de granos que se puedan procesar fácilmente mediante técnicas convencionales de beneficio. Las concentraciones económicas de granate limpio (grosularia y andradita) son raras, debido a que los granates de *skarns* tienden a ser relativamente suaves, y muchos contienen inclusiones de grano fino de carbonatos.

Recursos de granate existen en una amplia variedad de rocas. Los mayores depósitos se encuentran en Australia, Canadá, China e India, aunque en los últimos años se han reportado operaciones mineras en otros países del mundo, como Rusia, Turquía, Chile, República Checa, Pakistán, Sudáfrica, España, Tailandia y Ucrania, que producen principalmente para el mercado interno (USGS, 2017) (figura 3).

Existen otros depósitos que se clasifican entre los que contienen los mejores granates industriales (debido a una gravedad específica y a una dureza más alta); son de composición del almandino-piropo. Estos se encuentran en rocas metamórficas de alto grado y requieren generalmente la concentración secundaria en los placeres de la playa o de la corriente que se explotarán económicamente. Los ejemplos incluyen los depósitos situados en Idaho, Estados Unidos, y un depósito situado cerca de Geraldton, Australia occidental, en arena de playa, con reservas de 6000 toneladas y contenido de 35 % de granate. El depósito de Mount Riordan es uno de los *skarns* más grandes y de más alto contenido; su granate es conveniente para la producción de arena para pulido (*sandblasting*) y de otros productos abrasivos que requieren alta oblicuidad y una amplia gama de los tamaños de grano.

2.3. Métodos de prospección

Los estudios deben realizarse 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, que incluyen comprobación de la fotointerpretación y de anomalías geoquímicas y geofísicas antiguas. La inspección preliminar de campo se ejecuta con muestreos de sedimentos activos de corrientes y de concentrados de batea, que son muy importantes por la alta densidad de los granates, así como de rocas, y otros trabajos regionales, como pueden ser estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y gama-espectrométricos.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el depósito posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico para la detección de anomalías de wolframio, zinc y de cobre, labores mineras superficiales (trincheras y apiques) y trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos, gravimétricos y radiométricos. Se deberán obtener las dimensiones y morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos, se calcularán recursos inferidos, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

La exploración general permite la delineación inicial de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreos superficiales de afloramientos, trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos electromagnéticos y geoeléctricos, así como también la realización de apiques y algunas perforaciones, los cuales conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delinearán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características.

La exploración detallada permite la delineación tridimensional detallada de los depósitos mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes, tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y beneficio mineral. Se realizarán los estudios de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán recursos medidos, indicados e inferidos, y reservas probadas y probables.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se describen los sistemas de explotación y el procesamiento de mineral en lo referente a depósitos de granates.

2.4.1. Sistemas de explotación

La explotación de los yacimientos de granate en los depósitos de tipo primarios se efectúa preferiblemente a cielo abierto, mediante procedimientos convencionales que incluyen barrenación, arranque del material, acarreo y

trituración primaria. La minería es a menudo de carácter selectivo, y el mineral extraído se somete posteriormente a un proceso para separarlo del estéril; para esto se recurre a medios mecánicos como la trituración y molienda, luego de la cual se efectúa la separación mineralúrgica por el método gravimetría.

En los depósitos secundarios la explotación puede hacerse por dragado simple y separación de mineral útil, pero si el material grueso puede aportar considerables cantidades de granates, se ejecutará una molienda previa a la separación del mineral.

2.4.2. Procesamiento de minerales

Consiste en la realización de diversos procesos, que incluyen la molienda que se repite según las necesidades o el uso que se requiera. Luego se realizan otros, como clasificación, separación gravitacional, separación magnética, sedimentación en agua y separación por presión de aire.

Los productos de depósitos secundarios mezclados con arenas y gravas, luego de su extracción, se benefician mediante molinos rotatorios (*tromel*) y se tratan en cribas y en mesas concentradoras. El granate concentrado es secado, triturado y tamizado, para producir los diferentes tamaños requeridos.

El empaque del producto final requiere gran cuidado y control, para prevenir la mezcla de granos de diversos tamaños y para que el granate mantenga su limpieza y no se llegue a contaminar.

2.5. Recursos, reservas y comercio

A continuación se describe la situación actual de recursos y producción del granate a escala mundial.

2.5.1. Recursos y reservas

Según el Servicio Geológico Estadounidense (USGS, 2017), los recursos de granate son grandes y se presentan en una gran variedad de rocas, particularmente en gneises y esquistos, y aunque no existe información precisa sobre los recursos y las reservas del mundo, en especial de los de China y Australia, donde solo reportan recursos moderados grandes, las principales las reservas se encuentran en Estados Unidos, China, Australia e India (tabla 1).

En Estados Unidos existen grandes reservas de granate en concentraciones, en *gneiss* grueso cristalino, cerca de North Creek, Nueva York, y otros recursos significativos en Idaho, Maine, Montana, New Hampshire, Carolina del Norte y Oregón.

Existen otros depósitos importantes de granate en Australia. En China e India se extraen para el consumo nacional y los mercados internacionales. Los depósitos de Rusia y Turquía también se han explotado en estos últimos años, sobre todo para autoconsumo. También existen recursos cuantiosos en Canadá, Chile, República Checa, Paquistán, Sudáfrica, España, Tailandia y Ucrania, países donde se ha divulgado la realización de pequeñas operaciones de explotaciones mineras.

Tabla 1. Reservas y recursos de los principales productores de minerales de granate del mundo, periodo 1996-2016 (en toneladas métricas)

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	5 000 000	5 000 000	5 000 000	5 000 000	5 000 000
Australia	1 000 000	1 000 000	1 000 000	20 000 000	20 000 000
China	20 000 000	20 000 000	20 000 000	20 000 000	20 000 000
India	500 000	100 000	90 000	6 700 000	19 000 000
Otros	6 500 000	6 500 000	6 500 000	6 500 000	6 500 000
Total	33 000 000	32 600 000	32 590 000	58 200 000	70 500 000

Fuente: USGS (2017)

En la figura 4 se observa la participación de recursos de granates por países durante el año 2016 (USGS, 2017).

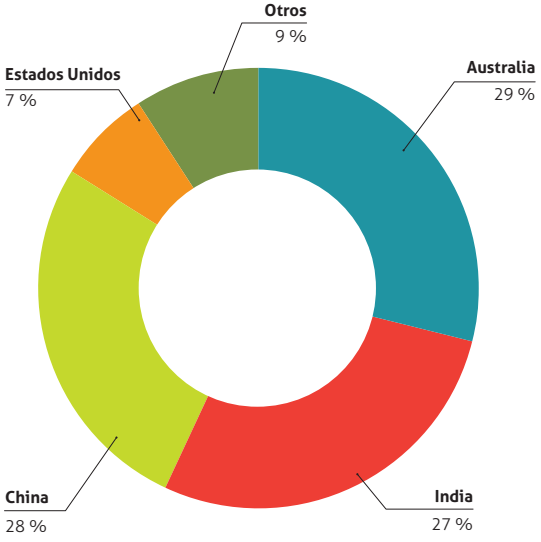


Figura 4. Participación de países en recursos de granate en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

2.5.2. Comercio

En el período 1996-2016 la producción mundial de granate industrial (tabla 2) creció en 1 500 000 toneladas, lo que representa un incremento del 1200 % respecto del total producido en 1996. En la figura 5 se observan los principales países productores en el año 2016.

Tabla 2. Producción minera estimada de granate industrial en el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	54 000	52 500	35 300	53 000	52 300
Australia	30 000	125 000	160 000	150 000	260 000
China	15 000	25 000	30 000	470 000	520 000
India	15 000	62 500	65 000	700 000	800 000
Otros	17 000	27 000	35 200	36 000	50 000
Total	131 000	292 000	325 500	1 409 000	1 682 300

Principales países, en toneladas métricas

Fuente: USGS (2017)

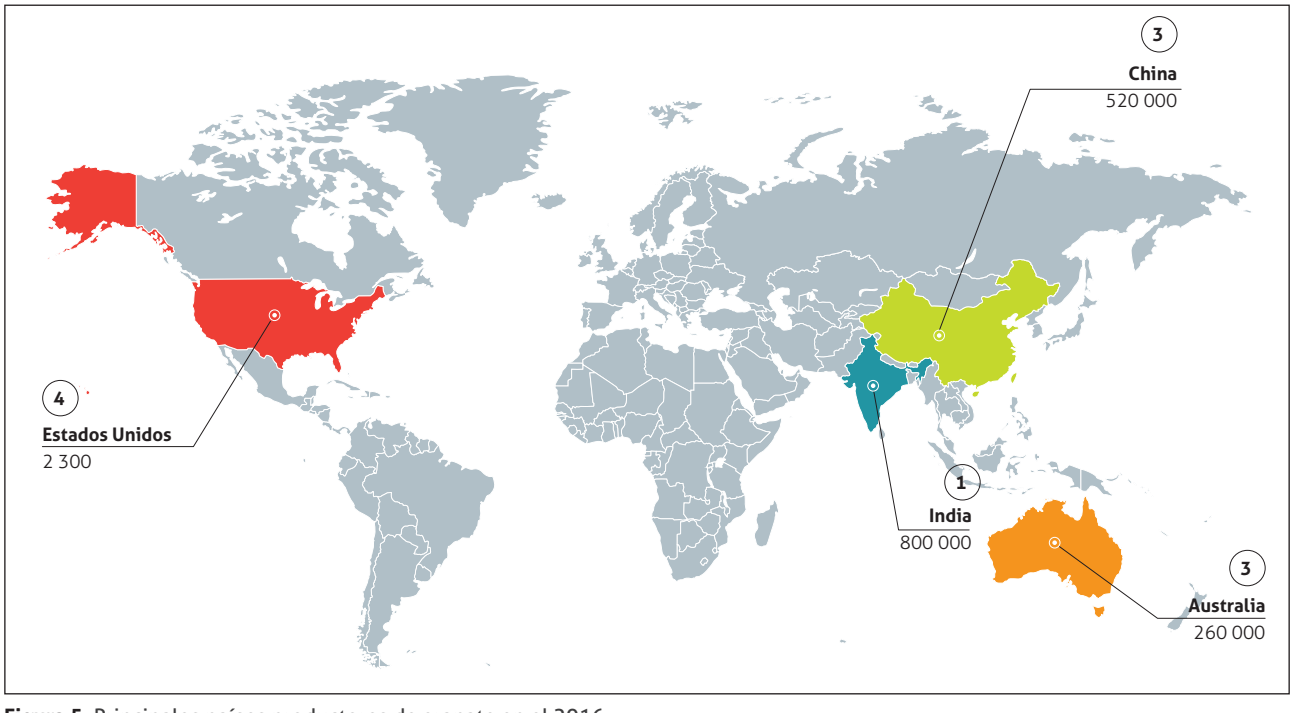


Figura 5. Principales países productores de granate en el 2016

Fuente: USGS (2017)

En el año 2016, India se consolidó como el primer productor del mundo, con una participación en la producción mundial del 48 %; China se mantuvo en la segunda posición, con una participación del 31 % en el total de la producción mundial, y Australia mantuvo el tercer lugar, con el 15 % (figura 6).

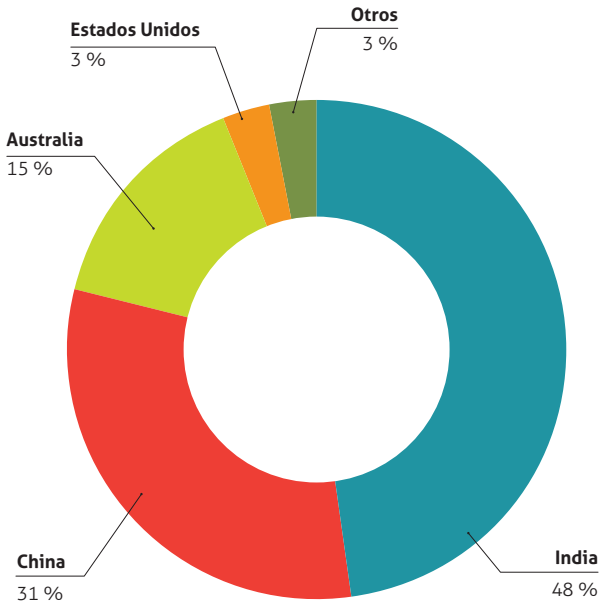


Figura 6. Participación por países en la producción de granate en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

En cuanto a los precios, según el USGS (2017), dependen en gran medida de las aplicaciones, calidad, cantidad, fuentes y tipos. En los Estados Unidos, durante el año 2016 los valores de los diferentes usos de los concentrados crudos estuvieron en el rango de USD $100/t a USD $225/t, con un promedio para el año de USD $204/t, y los diversos usos del granate refinado se movieron en el rango de USD $100/t a USD $400/t.

2.6. Perspectivas

China e India, que actualmente son los dos principales productores de granate en el mundo, estiman que seguirán incrementando su producción en los próximos diez años (USGS, 2017).

Los incrementos crecientes de gastos para la defensa podrían conducir a los Estados Unidos a una demanda creciente de granate, puesto que las industrias aeronáutica y naval utilizan cantidades significativas de granate para la limpieza y el terminado de las superficies metálicas y para usarlo en el corte mediante las tecnologías del *waterjet*.

3. Granate en Colombia

En Colombia se conocen algunas manifestaciones de granates, aunque hasta el momento no han tenido mayor importancia comercial; sin embargo, su presencia confirma la existencia de ambientes favorables tanto para depósitos primarios como secundarios.

3.1. Geología regional

En Colombia existen unidades litológicas con ambientes de depósito similares a los descritos de otras partes del mundo, en las siguientes provincias litosféricas: Continental Mezoproterozoica Grenvilliana (PLCMG) y Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA) (Gómez, et. al., 2006), en las áreas donde se localizan las rocas metamórficas de medio a alto grado de metamorfismo, así como también en las provincias litosféricas oceánicas Neoproterozoica Arquía (PLONA), en rocas metamórficas como las arriba mencionadas, Cretácica La Guajira (PLOCG), en la Sierra Nevada de Santa Marta y Península de la Guajira, y Cretácica Occidental (PLOCO), en las zonas de alteración metasomática de contacto, sobre todo en zonas de *exoskarn* de minerales metálicos (hierro, cobre, plomo, zinc, molibdeno, wolframio, oro y plata) y depósitos sedimentarios de redeposición del material primario desagregado por meteorización de los depósitos primarios mencionados (terrazas y depósitos aluviales).

Es decir que las posibilidades de localizar granates en concentraciones industriales están presentes en las seis provincias metalogénicas en que está dividido el país: Escudo Guayanés, Sierra Nevada-Guajira, Continental Oriental, Continental Central, Cauca-Romeral y Oceánica Occidental.

3.2. Geología local

Aun cuando en la actualidad en Colombia no se conoce la existencia de minas donde se explote formalmente el granate, se sabe de su presencia por descripciones de su existencia en las granulitas de la Sierra Nevada de Santa Marta; según Mutis (1983), existen otras manifestaciones, pero sin mayor importancia industrial. Sin embargo, según Núñez (1987), en el pasado, en el departamento de Antioquia se realizaron algunas explotaciones a pequeña escala.

Los depósitos de cobre en *skarns* de Mina Vieja y El Sapo, en el departamento del Tolima, presentan distribuciones interesantes de granates. También en la zona de Yacopí, Cundinamarca, en túneles de exploración para esmeraldas, se han observado concentraciones interesantes de granates en un sistema complejo pegmatítico-pneumatolítico, con mineralizaciones mesotermales de zinc-cobre y alteraciones skárnicas con abundante granate, epidota y magnetita; situaciones similares se presentan en minas esmeraldíferas de Muzo y otras (comunicación verbal de René Lugo).

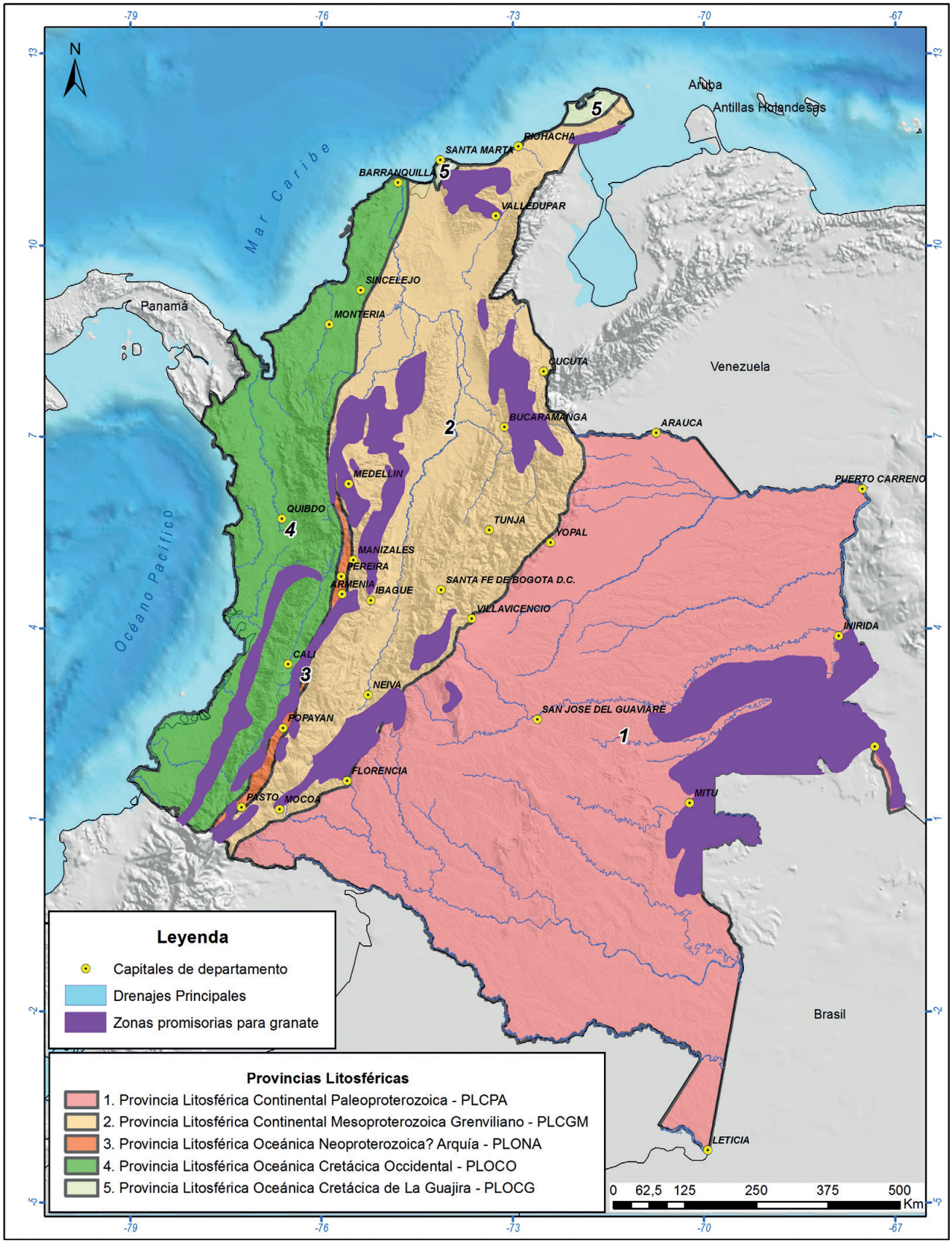


Figura 7. Mapa de principales áreas donde potencialmente podría haber minerales de granate

Fuente: Gómez *et al.*, 2006

3.3. Situación actual de la minería

Las perspectivas del país consisten en mantener al menos los actuales niveles de consumo, fundamentalmente en usos específicos para abrasivos. Se reportan once títulos mineros vigentes para piedras preciosas en el país, según el Catastro Minero.

Teniendo en cuenta el potencial existente en el país para la localización de depósitos donde puede encontrarse granate, sería interesante identificar prospectos que propicien el desarrollo de una oferta nacional, sin desconocer las oportunidades de mercados en otros países del área.

Depósitos de *skarns* de metales en zonas de *exoskarn* (El Sapo y otros, por ejemplo), además en rocas pegmatito-pneumatolíticas al estilo de las alteraciones metasomáticas hidrotermales portadoras de las mineralizaciones de esmeraldas en Colombia, conviven con mineralizaciones skarníferas de zinc- cobre en las que abundan los granates.

3.3.1. Potencial

En el marco de las provincias litosféricas Grenvilliana (PLCMG) y Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA), existen ambientes favorables para la mineralización de granate en las cordilleras Central y Oriental, Sierra Nevada de Santa Marta, península de la Guajira y el Escudo Guayanés, en las áreas donde se localizan las rocas metamórficas de medio a alto grado de metamorfismo, además de las restantes provincias litosféricas arriba señaladas (figura 7). Es posible que una investigación metódica de los depósitos de *skarns* conocidos de metales en las diferentes provincias ofrezcan, sobre todo en el *exoskarn*, la definición de la ocurrencia en magnitudes industriales, de diversas variedades de granate.

Producción. No existe información oficial sobre producción de granates en Colombia, por lo que en la actualidad la demanda se cubre mediante importaciones del producto.

Importaciones. La información de la UPME (2017) registra las importaciones de granate natural en una presentación que incluye otros abrasivos, como esmeril, corindón natural y demás abrasivos naturales, por lo que resulta dispendioso conocer específicamente lo correspondiente al granate natural; no obstante, sabiendo que se usa fundamentalmente como abrasivo y conociendo el comportamiento de estas importaciones, puede tenerse una idea general de la tendencia del comportamiento de lo correspondiente al granate. En el período 2007-2016, las importaciones de abrasivos en todas sus presentaciones en general mostraron una tendencia de crecimiento, que en el año 2015 tuvo su pico máximo, con 1000 t, lo que significa que se ha incrementado la demanda nacional de estos productos (figura 8).

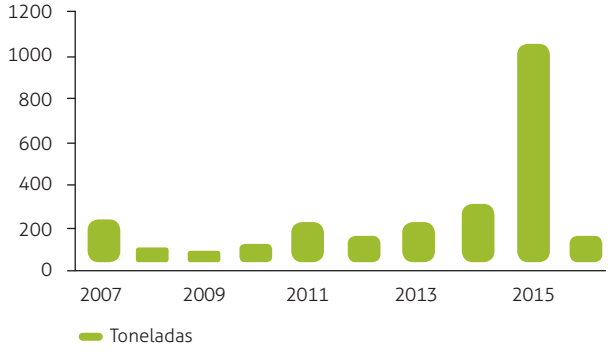


Figura 8. Comportamiento de las importaciones de abrasivos en el período 2007-2016

Fuente: UPME (2017)

3.3.2. Comercio

Exportaciones. Como cabe esperar, según el DANE (2007), no se registran exportaciones de abrasivos, con excepción de los años 1996, 2001, 2002 y 2005, fechas en que se realizaron pequeñas exportaciones en el orden de kilogramos, fundamentalmente a Venezuela y Panamá, que probablemente fueron excepcionales, motivados en excedentes de inventarios.

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Otros abrasivos naturales y manufacturados pueden sustituir en cierta medida a los granates. En muchos casos, sin embargo, el uso de los sustitutos implicaría sacrificios en calidad y costo.

El óxido de aluminio (alúmina) fundido y la estaurolita compiten con el granate como un material de *sand blasting*, la ilmenita, la magnetita y algunos plásticos compiten como medios de filtración. El corindón, el diamante y el óxido de aluminio (alúmina) fundido compiten en muchas operaciones de pulido de materiales.

El óxido de aluminio fundido, la arena de cuarzo y el carburo de silicio lo pueden reemplazar en el proceso de acabados de plásticos, de muebles de madera y de otros productos.

Bibliografía

Cox, D. y Singer, D. (2002). *Mineral deposit models*. USGS.

DANE (2007). *Estadísticas sobre importaciones y exportaciones de minerales*. Bogotá: DANE.

Evans, J., Moyle, P., David, F y Olson, D. (2006). Garnet: An essential industrial mineral and january's birthstone. En *USGS, Western Mineral Resources. Fact Sheet 2006-3149 Version 1.0*. Disponible en https://pubs.usgs.gov/fs/2006/3149/.

Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al*. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas

Hurlbut, C. y Klein, C. (1984). *Manual de mineralogía*. Madrid: Reverté.

Mutis, J. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.

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

Phillips, W. y Phillips, W. (1986). *Fundamentos de mineralogía pata geólogos*. México: Limusa.

Rayo, G. (1998). Skarns de granate. En *Perfiles seleccionados del depósito mineral de Columbia Británica*. Victoria: BCGS.

Smirnov, V. (1982). *Geología de yacimientos minerales*. Moscú: MIR.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). Disponible en http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_Importaciones.aspx?idModulo=4

USGS. (2006). *Garnet-An Essential Industrial Mineral and January's Birthstone*. Washigton.

USGS (2017). *Gartnet: statistics and information*. Disponible en https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/garnet/









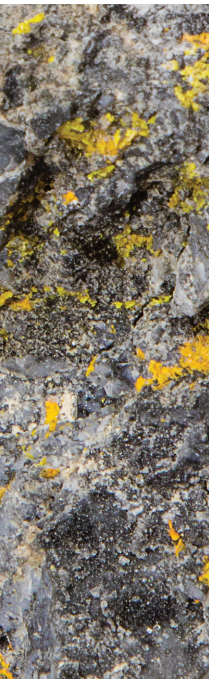

Recursos minerales de Colombia
se terminó de imprimir
en la Imprenta Nacional de Colombia,
en octubre de 2019.

Para su composición se utilizaron
las tipografías MinionPro para el cuerpo de texto.
Aller y Trump Gothic East para la titulación.

Bogotá, Colombia

El Servicio Geológico Colombiano, entidad de ciencia y tecnología adscrita al Ministerio de Minas y Energía, desde hace algunos años viene adelantando la labor de actualizar la información sobre recursos minerales de Colombia, razón por la cual ha elaborado publicaciones dedicadas a minerales o a grupos de minerales específicos, tales como el carbón y las calizas, sobre los cuales se han entregado reportes que ya han sido divulgados. En esta ocasión, como producto del trabajo de varios años de profesionales con estudios y experiencia en diversas disciplinas, la Dirección de Recursos Minerales hace entrega de dos volúmenes en los que se presentan otros minerales de interés que se encuentran en el territorio colombiano.

El subsuelo colombiano posee diversos recursos minerales, que la naturaleza generosamente ha otorgado a este territorio, como resultado de procesos endógenos y exógenos, de naturaleza geológica, geoquímica, geofísica y metalogénica, que unidos a las cambiantes condiciones climáticas ocurridas a lo largo de millones de años, han modelado la fisiografía y los depósitos minerales existentes actualmente en Colombia.





ISBN: 978-958-52469-4-2