



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 $\frac{3}{8}$ 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 $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm) y son retenidas por un tamiz de $\frac{1}{4}$ 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 *sand 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 m³ 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 arenas

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 compresión (N/mm ²) (2)	Coefficiente 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)	Coefficiente de fragmentación (%)	Coefficiente 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)
Esquistos	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 depo-

sitar 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 clásicos 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 volú-

menes 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)

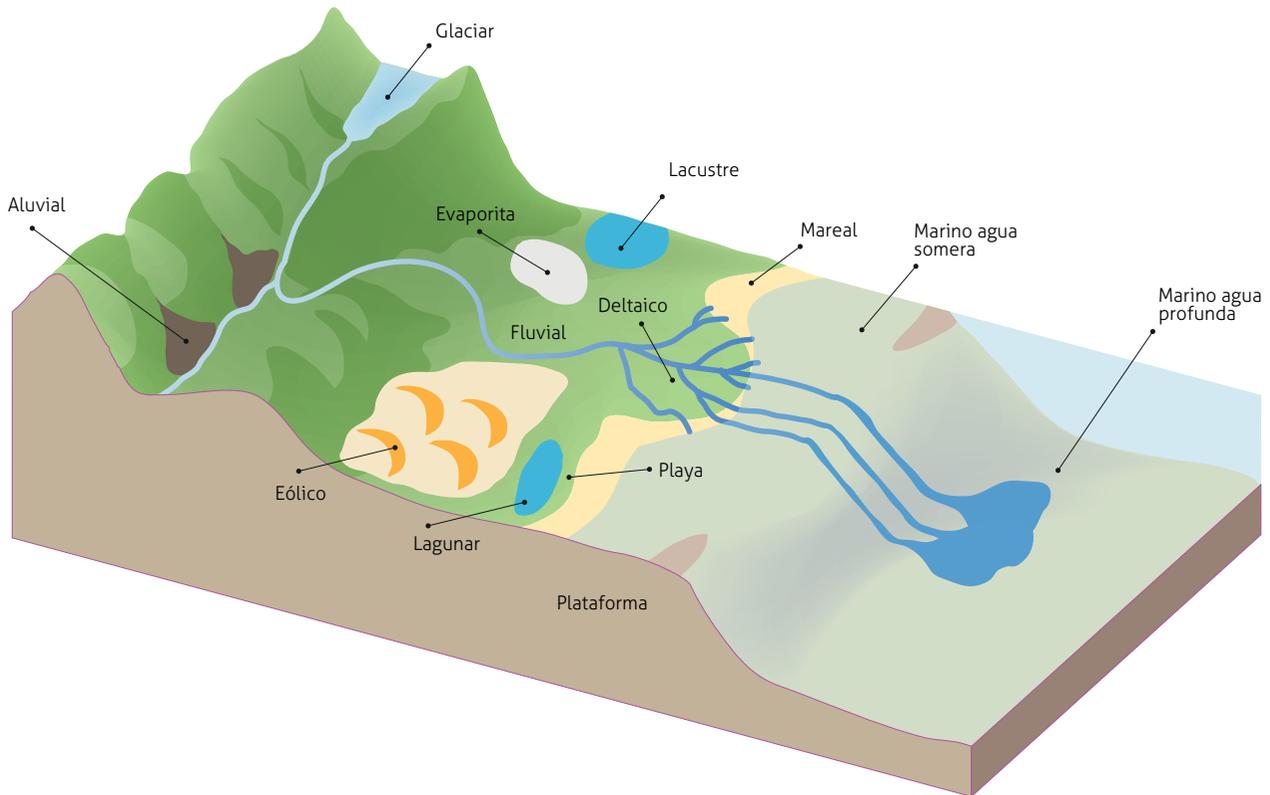


Figura 1. Esquema de ambientes sedimentarios

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 meandriiformes, 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 química

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 (sílice**, calcárea, arcillosa, ferruginosa). Con otros constituyentes pueden ser arcosas o grawacas
Química y bioquímica	
Calcárea	Caliza*, dolomita*
Precipitación química	Pederal**, 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 (vitreas). Algunas pueden ser frágiles y astillosas; otras pueden ser positivas a la reacción álcali-agregado.	Pumita	Cuarzo entre 66 y 52 %	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 mármo-

les 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 geoelectrónicos, 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 geoelectrónicos, 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.

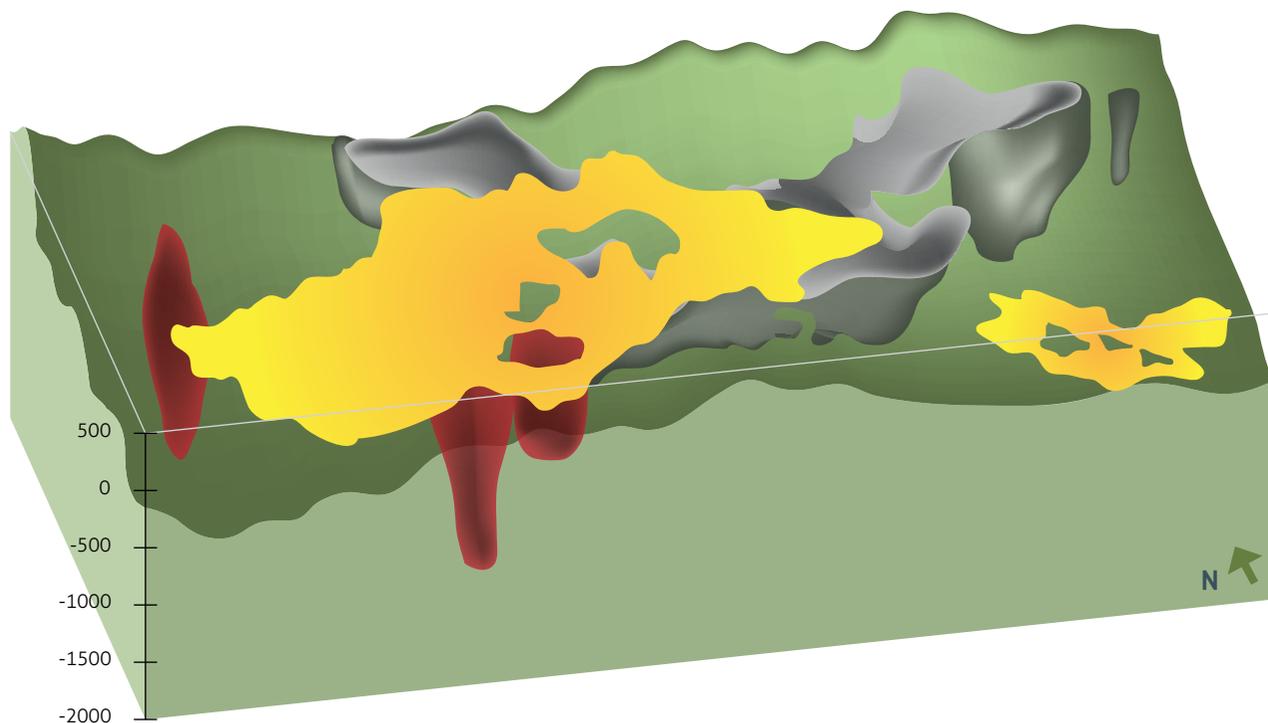


Figura 2. Modelo geológico

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.

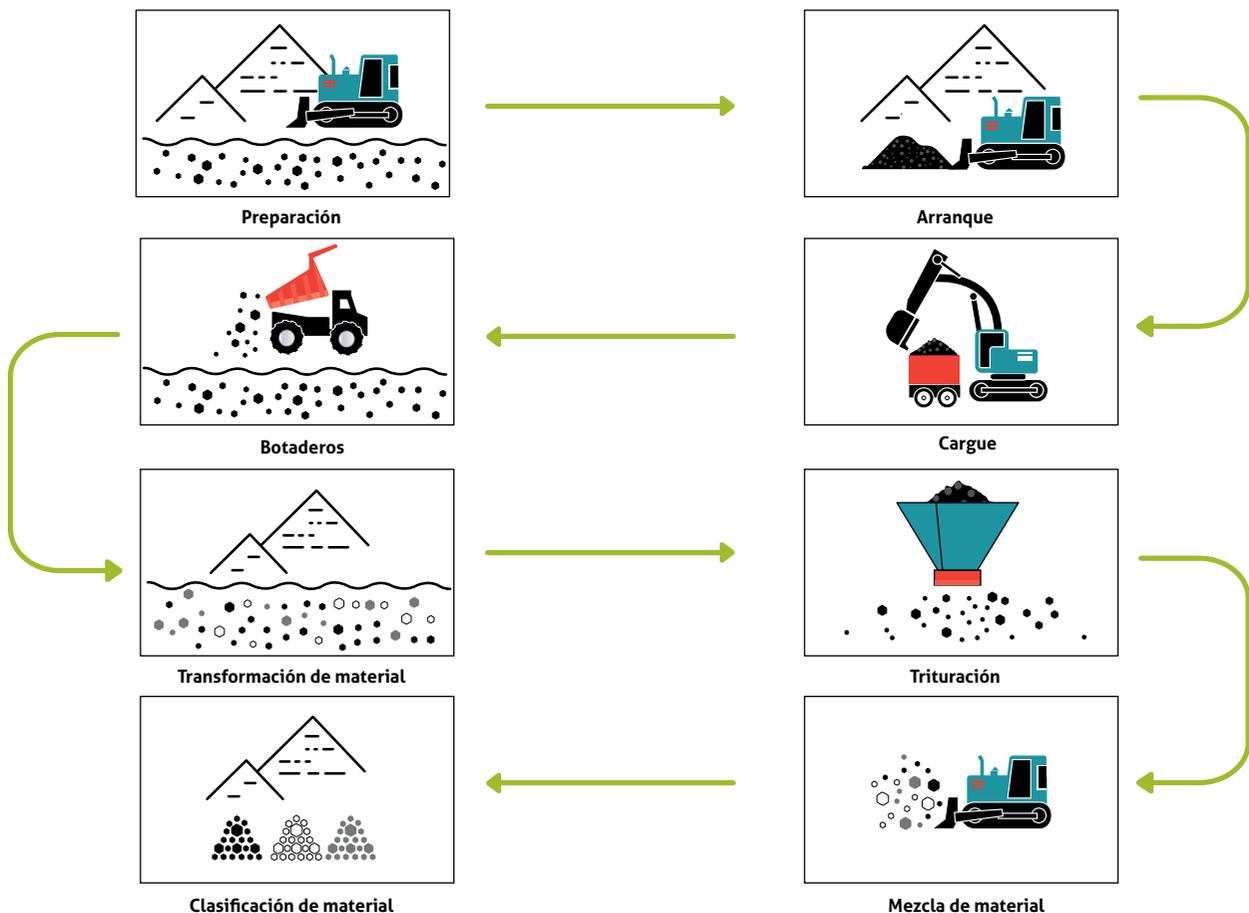


Figura 3. Esquema de una explotación, trituración y selección de material pétreo

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.ª 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 trituración de 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.

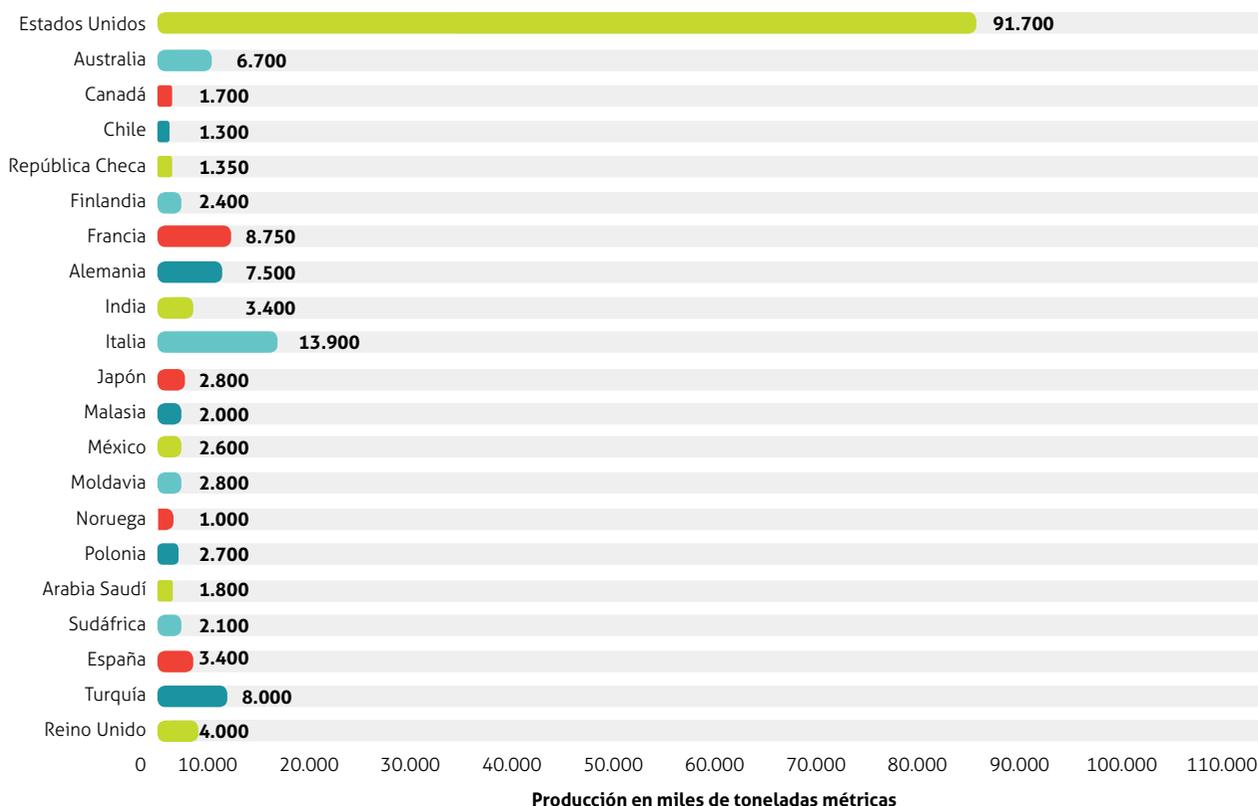


Figura 6. Producción de arenas y gravas durante el año 2016 (en miles de toneladas métricas)

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 geoméricamente 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 stratigráficas 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 rela-

ción 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 proximales, 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.

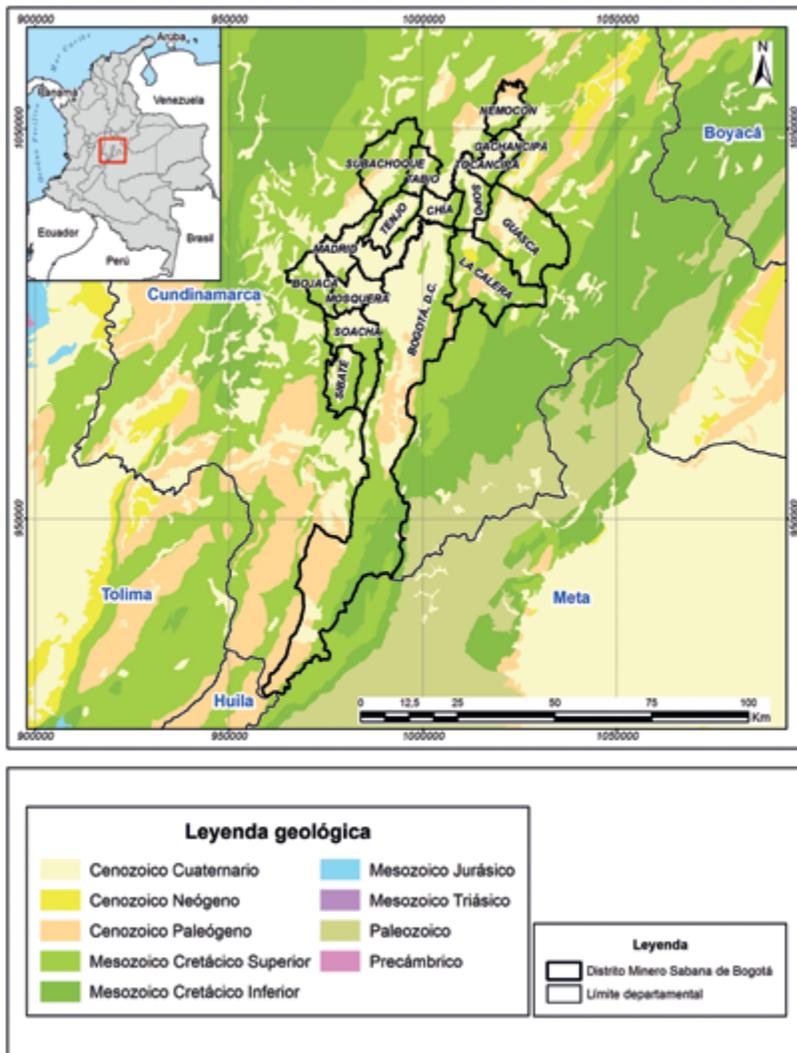


Figura 7. Distrito minero Sabana de Bogotá
Fuente: UPME (2005)

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 m³ y 1 894 291.86 m³ 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	
Chaguani	
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 deleznable 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 Sini-faná. 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

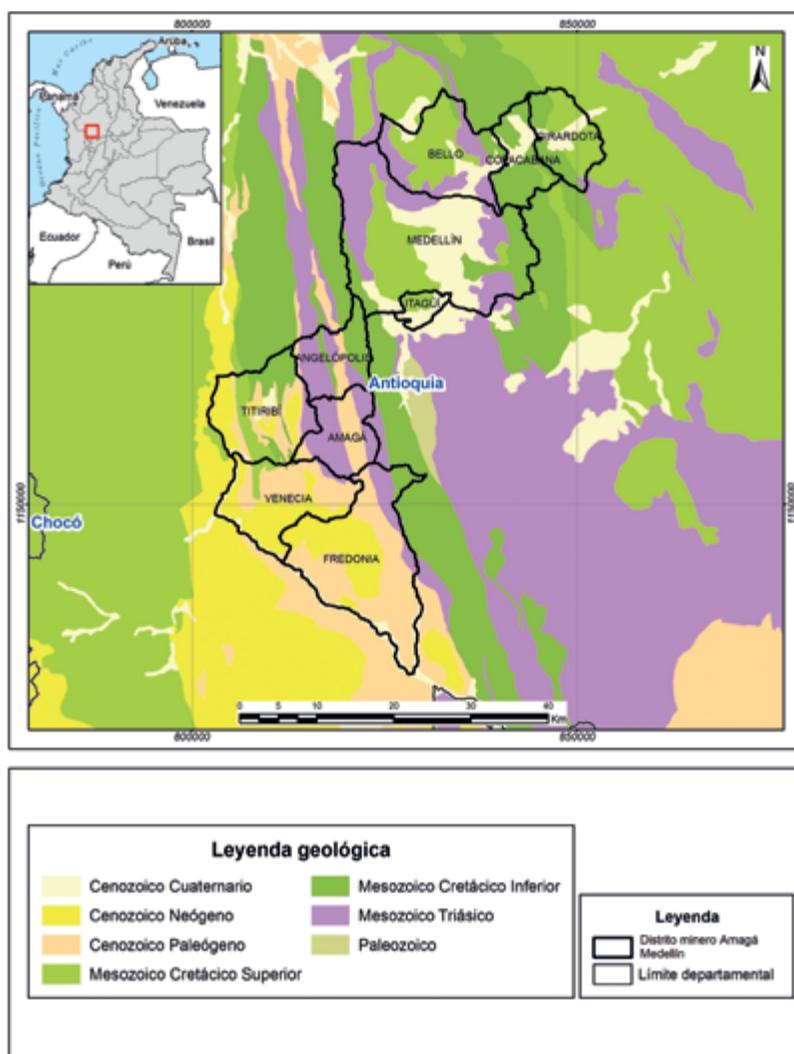


Figura 8. Distrito minero Amagá-Medellín

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 arenas 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 hipoabissales 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 m³ y 203 668.96 m³ 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		
Carepa	Grava	203 668.96
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 m³ y 576 279.51 m³ 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).

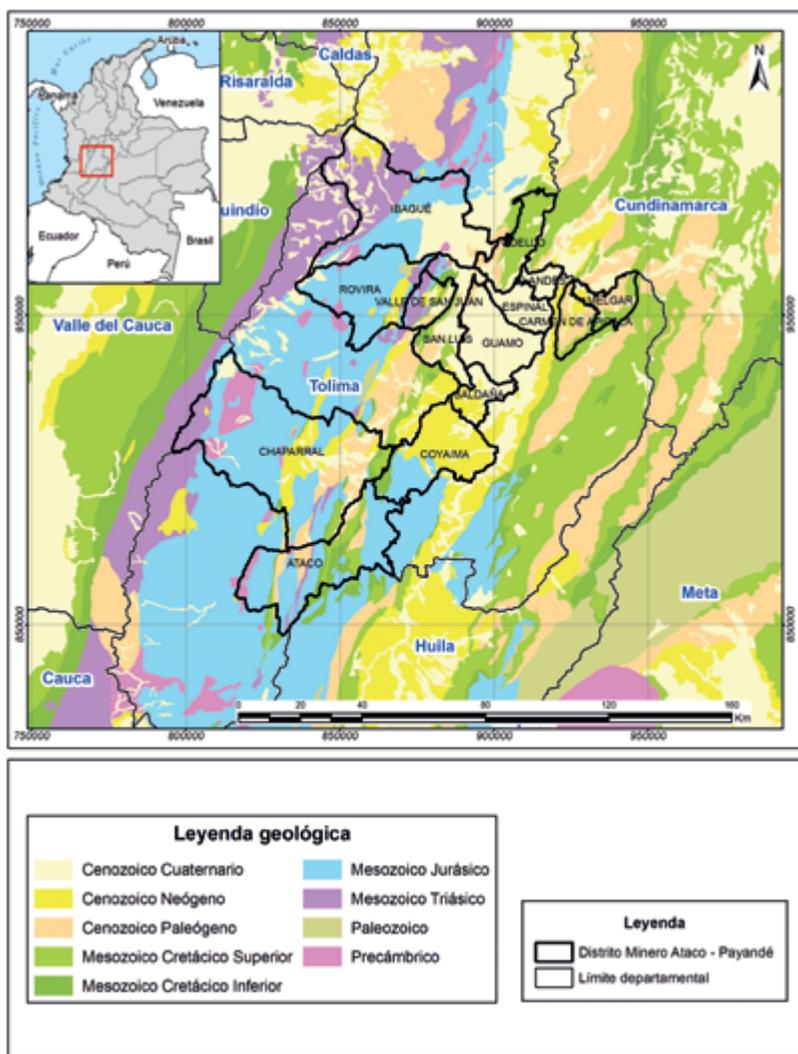


Figura 9. Distrito minero Ataco-Payandé

Fuente: UPME (2005)

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

Municipio	Producción en 2017 (m³)		Municipio	Producción en 2017 (m³)	
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 trituration de algunas calizas.

En la tabla 14 se reporta, de los departamentos de Atlántico y Bolívar, una producción de arena de 345 926.20 m³ y 321 303.70 m³ 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).

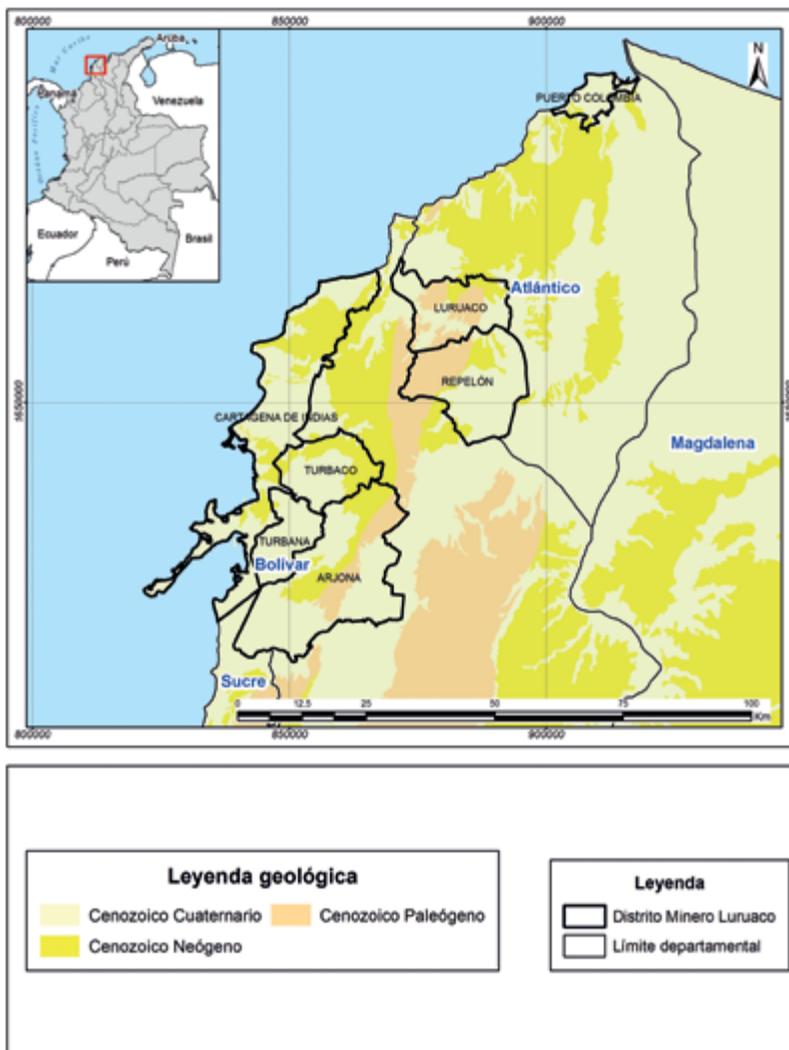


Figura 10. Distrito minero Luruaco

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	Grava	321 303.70
	Turbaco		
Atlántico	Juan de Acosta	Grava	321 303.70
	Luruaco		
	Repelón		
Bolívar	Cartagena	Grava	321 303.70
	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 recibos y triturados. De este distrito se extraen además importantes volúmenes de caliza y, en menor escala, carbón, bentonita, magnesita y feldespato (figura 11).

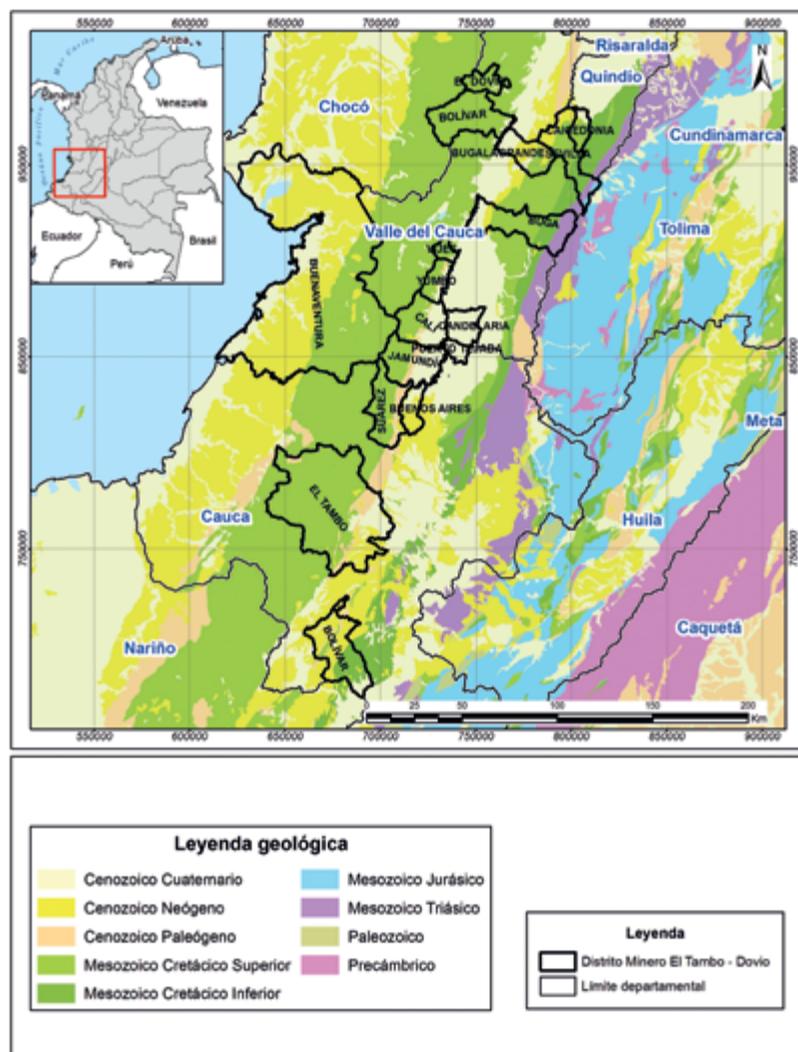


Figura 11. Distrito minero El Tambo-El Dovio

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 m³ y 368 631 m³ 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	Arenas
	Ansermanuevo	
	Buenaventura	
	Bugalagrande	
	Caicedonia	
	Cartago	
	Jamundí	
	La Victoria	
	Obando	
	Palmira	
	Roldanillo	
	Tuluá	
	Vijes	
	Yotoco	
Yumbo		
Cauca	Popayán	Gravas
	Balboa	
	Bolívar	
	Buenos Aires	
	Corinto	
	Guachené	
	Mercaderes	
	Rosas	
	Totoró	
	Cali	
Valle del Cauca	Ansermanuevo	Gravas
	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, recibos 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 (m³)		Departamento	Producción en 2017 (m³)	
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		1 193.00	Cesar		45 757.80
Córdoba		215 279.00	Chocó		63 609.75
Guaviare		5 697.00	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		7 298.00	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		2 860.00			
Total	4 737 504.56		Total	1 250 897.760	

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

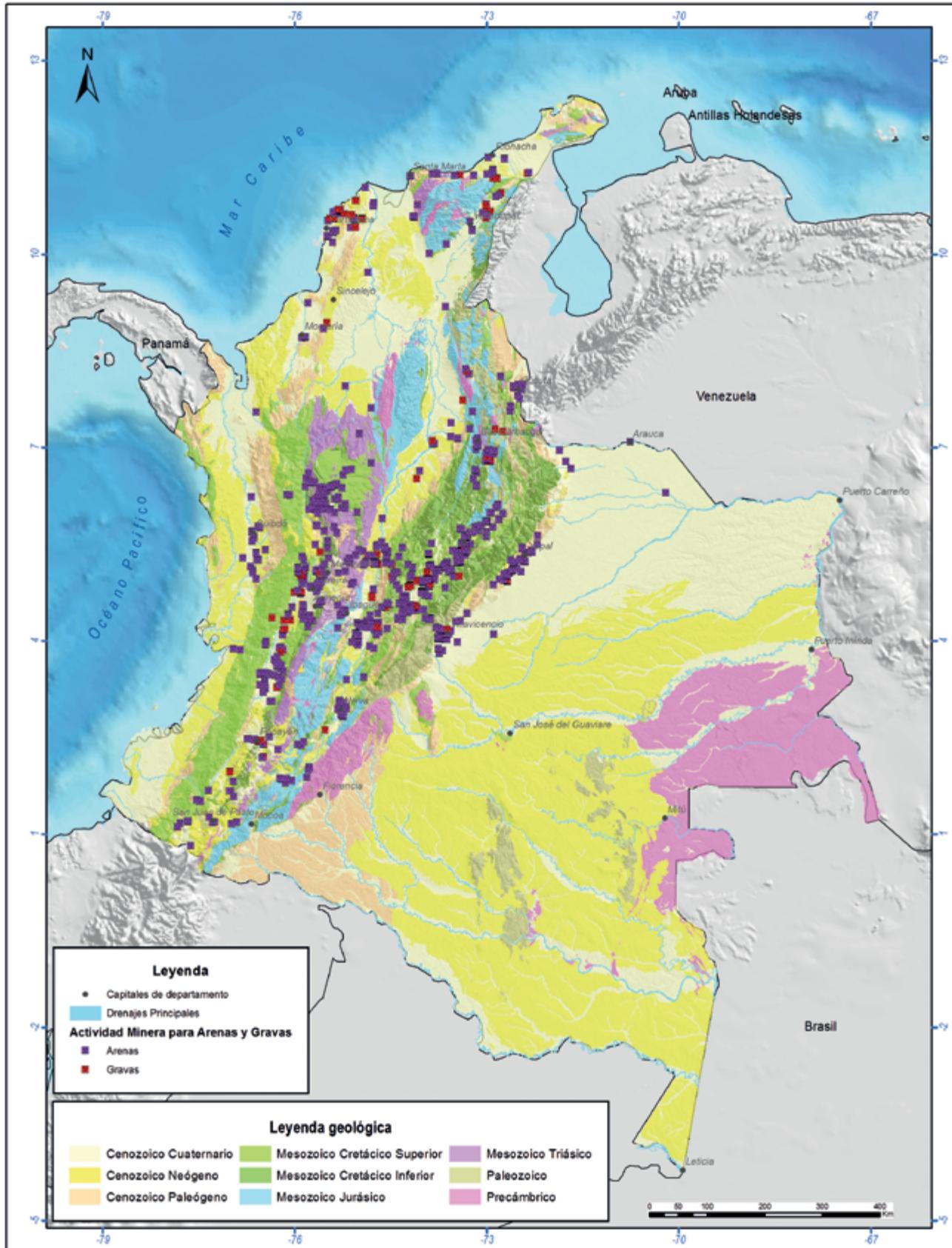


Figura 12. Actividad minera de arenas y gravas en Colombia

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 los 30 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 retrolenado, 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 buldóceros 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 m³ (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 síliceas	m ³	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).

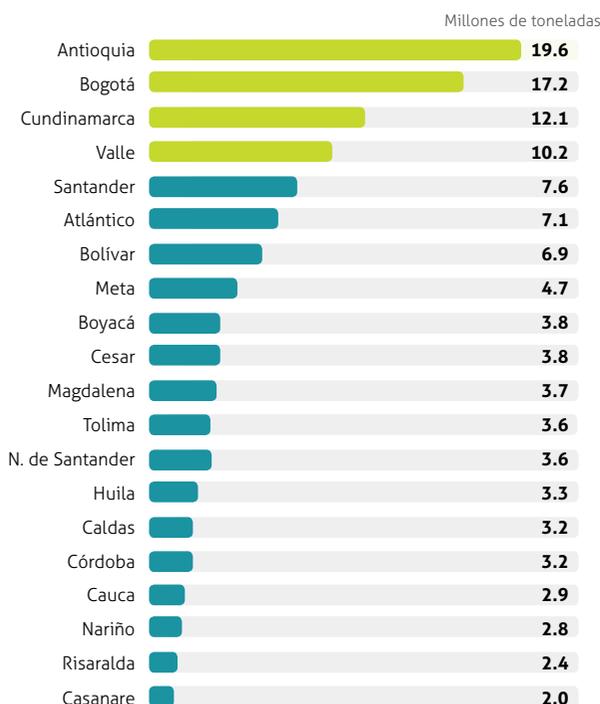


Figura 13. Demanda de materiales de construcción en el año 2015 en Colombia

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

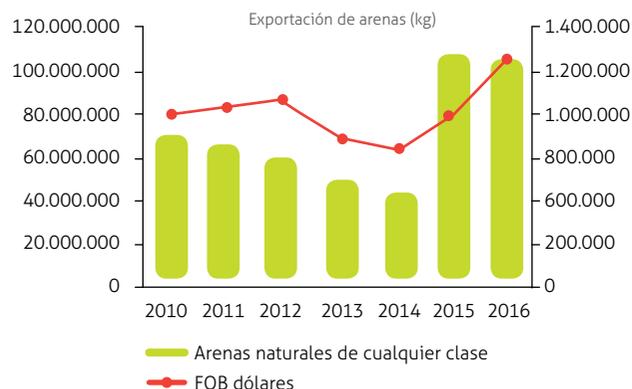


Figura 14. Exportaciones de arenas en el periodo 2010-2016

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.

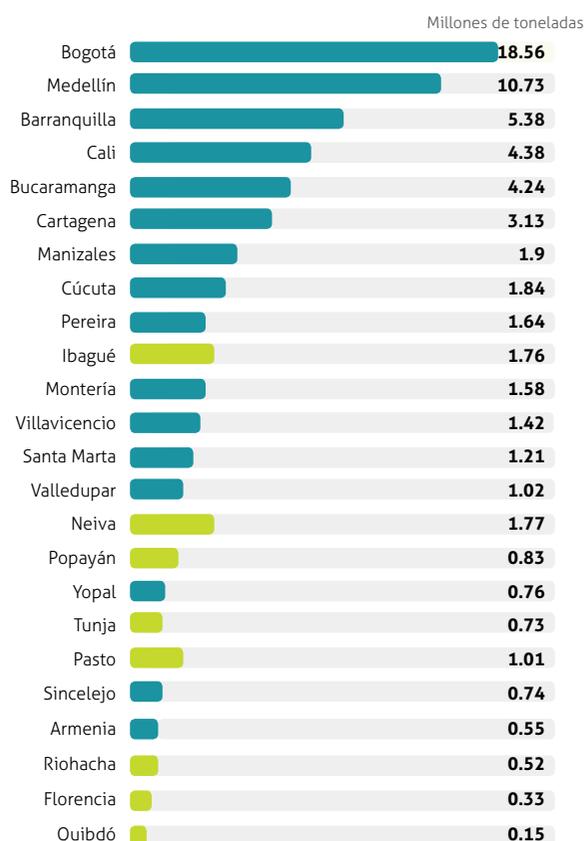


Figura 15. Proyección de demanda de materiales de construcción para el año 2025

Fuente: Mundo Minero (2016)

Para concluir, hay que acotar 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 península 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.
- Bradanic, 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- Históricas*. 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 Technica*, 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 Geological 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.
- Marquinez, 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. Bogotá: Ingeominas.
- Servicio Geológico Colombiano (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: Université 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). *Resolución 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=Produccion%20de%20arenas%20en%20Colombia%202013%202017>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2017b). *Informe de producción anual - Minerales industriales. Informe interno*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017c). *Informe de producción 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.