

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



Rocas ornamentales

Javier Eduardo Becerra y Orlando Pulido González

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

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

El empleo de rocas en la ornamentación es una de las actividades más antiguas del hombre. Los egipcios, 2600 años a. C., utilizaron bloques de calizas y granitos para

la construcción de las pirámides. Los palacios, tumbas, monumentos, basílicas, columnas, termas y acueductos de las culturas persa, griega y romana se caracterizan por el amplio uso de la roca en su construcción. Generalmente, los términos *rocas ornamentales*, *pedras ornamentales*, *pedras naturales* y similares hacen referencia a aquellas rocas que, sin sufrir tratamientos diferentes de los procesos normales de corte, pulido o tallado, se usan para fabricar productos que exhiban sus propiedades naturales. Por tanto, deben ser rocas que por sus características físicas y tecnológicas, y por su grado de fracturación, permitan su explotación en forma de bloques.

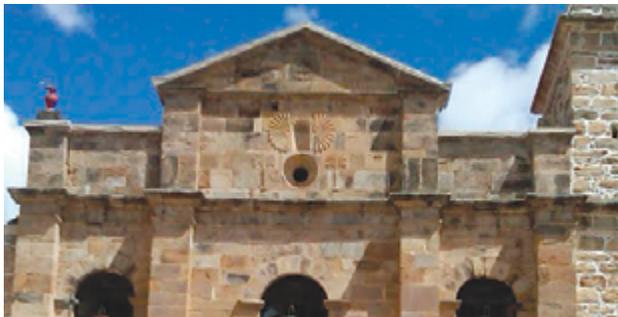


Figura 1. Utilización de rocas ornamentales. Superior izquierda: arenita para la fabricación de ornamentos de la iglesia colonial de Tutazá. Superior derecha: lascas de areniscas de la Fm. Une utilizadas en andenes y paredes exteriores del pueblito Boyacense (Duitama). Inferior izquierda: parque central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

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

1. Usos

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

1.1. Clasificación de rocas ornamentales

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

1.1.1. Granitos

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



Figura 2. Ejemplo de granito

Fuente: Jair Ramirez, SGC

1.1.2. Mármoles y calizas marmóreas

Conjunto de rocas constituidas fundamentalmente por minerales carbonatados de dureza 3-4 (calcita, dolomita, etc.). Esta denominación incluye los mármoles propiamente dichos, que son rocas metamórficas compuestas

esencialmente de calcita o de dolomita. Las calizas denominadas *marmóreas* son rocas carbonatadas, a menudo recrystalizadas, compactas, de grano fino, que normalmente tienen vetas de calcita e impurezas que proporcionan colores variados, y que a veces incluyen fósiles. Se incluyen en este grupo los travertinos y las serpentinitas (figura 3).



Figura 3. Ejemplo de mármol metamórfico

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

1.1.3. Pizarras

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



Figura 4. Pizarras ornamentales

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

1.1.4. Otras piedras

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

1.2. Aplicaciones de las rocas ornamentales

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

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

1.2.1. Recubrimiento de fachadas o exteriores

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

1.2.2. Recubrimiento de techos

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

1.2.3. Recubrimiento de interiores

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

1.2.4. Recubrimiento de pisos

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

1.2.5. Usos domésticos

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

1.2.6. Muros y cercas de roca

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

1.2.7. Obras de arte y esculturas

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

1.2.8. Arte funerario

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

Atendiendo al tipo de roca, se describen los usos principales así: los depósitos de pizarras, filitas y esquistos se utilizan en láminas para cubrir los techos de pequeños edificios. Los neis se utilizan en la construcción, para pavi-

mentación de carreteras, baldosas, aceras y mamposterías. Las anfibolitas ocasionalmente se usan como piedras de ornamentación. Las serpentinas a menudo son empleadas en la construcción, como revestimiento, en forma de láminas pulimentadas.

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

2. Ambiente geológico

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

2.1. Características

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

2.1.1. Físico-químicas y mecánicas

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

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

Tipos de roca		Propiedades			
		Densidad aparente (kg/cm ³)	Absorción de agua aparente (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (tres puntos, MPa)
Granitos		>2560	<0.4	>131	10.34
Mármoles	Travertino	>2595	<0.75	>52	>7
	Calcítico	>2800	<0.75	>52	>7
	Serpentinítico	> 2690	< 0.75	> 52	> 7
	Dolomítico	> 2305	< 0.75	> 52	> 7
Calizas	Baja densidad	1760/2160	< 12	> 12	> 2.9
	Media densidad	2160/2560	< 7.5	> 28	> 3.4
	Alta densidad	> 2560	< 3.0	> 55	> 6.9
Areniscas	> 60 % SiO ₂	> 2160	< 20	> 13.8	> 2.1
	> 90 % SiO ₂	> 2400	< 3	> 68.9	> 6.9
	> 95 % SiO ₂	> 2560	< 1	> 137.9	> 13.9

Fuente: Frazão (2002)

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

Otros ensayos de suma importancia aplicados a las rocas ornamentales son los de alterabilidad, que permiten establecer el comportamiento de la piedra natural ante diversas condiciones medioambientales y las solicitaciones a que va a someterse. La determinación de la alterabilidad comienza con el análisis petrográfico, que permite describir la composición mineralógica básica de la roca, así como su cristalización y estructura, y definir las características mineralógicas y texturales que pueden precisar la susceptibilidad de la roca a los procesos de alteración. Otros ensayos especializados, conocidos con el nombre de *ensayos de envejecimiento* o *de alteración acelerada*, son de necesaria realización para evaluar la alterabilidad de las rocas. Estos ensayos están regidos por normas específicas, como el ensayo de cristalización de sales (EN12370) y el de envejecimiento por acción del SO₂ (EN13919), y junto con la aplicación de técnicas analíticas, como la difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF) y la microscopía electrónica de barrido (SEM), permiten hacer un análisis científico muy completo sobre la naturaleza de la roca, al

igual que sobre su comportamiento y alterabilidad ante diferentes condiciones ambientales y a sus usos específicos (figura 5).

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

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



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

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

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

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

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

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

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

2.1.2. Comerciales

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

En relación con la dureza, los granitos son considerados rocas duras. La resistencia de estos materiales a esfuerzos compresivos puede ser superior a los 2000 kg/cm², o su equivalente, 200 Mpa (megapascales).

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

En función de la proporción de minerales máficos o félsicos, los granitos comerciales pueden dividirse en dos grandes grupos: granitos claros, que engloban especies

como la adamelita, granodioritas, sienitas, granitos en sentido estricto y rocas metamórficas, y granitos oscuros, que incluyen gabros, dioritas, diabasas, pórfidos e incluso rocas volcánicas.

En el grupo de los mármoles se incluyen todas las rocas constituidas por minerales ricos en carbonatos, con dureza entre 3 y 4, de acuerdo con la escala de Mohs, calcita y fluorita, respectivamente. En este intervalo de dureza están los mármoles en sentido estricto, las calizas cristalinas, los travertinos y otras variedades calcáreas. También se incluyen en tal categoría las serpentinitas, que a pesar de ser rocas metamórficas, comercialmente se conocen con el nombre de *mármol verde*. Las rocas del grupo de los mármoles presentan por lo regular resistencias inferiores a los 1000 kg/cm², pero superiores a los 400 kg/cm², y se consideran con una dureza intermedia o semidura.

El grupo de las metamórficas generalmente se denominan con el término de *pizarras* e incluyen a las mismas pizarras y filitas en el sentido geológico. Se caracterizan por partirse en lascas sin necesidad de ser sometidas a procesamientos de aserrados. Se utilizan para revestir fachadas y techar casas. Este grupo de rocas se caracteriza por presentar *dureza relativamente blanda*, con una resistencia a la compresión menor de 400 kg/cm² (40 MPa) (Pla y Herrera, 2002).

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

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

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



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

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

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

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

- Tipo de recubrimiento (vegetal, suelo) y su espesor, factor importante debido al costo del descapote, que puede viabilizar o inviabilizar un área.
- Tamaño del área, infraestructura vial, tendidos de redes eléctricas, fuentes hídricas para el desarrollo de las actividades de extracción y control de elementos particulados. Estos factores inciden en forma positiva o negativa en la selección de áreas de interés, ya que determinan el rendimiento de las actividades de extracción y transporte, lo que genera ahorros o aumento de costos.
- Factores ambientales, considerando el impacto que las actividades extractivas van a tener sobre el medio físico (atmósfera, agua y suelo), el medio biótico y antrópico cercano a las posibles áreas de interés, y las modificaciones del paisaje, entre otros factores (figura 7). Igual-

mente, hay que tomar en cuenta la generación de residuos, su disposición y su reaprovechamiento para fines industriales. Un análisis cuidadoso permitirá determinar las mejores estrategias para el desarrollo de mina compatible con la conservación del medio ambiente, así como definir los indicadores y umbrales permitidos para que el proyecto pueda ser viable.

- Los aspectos legales y la tradición minera, aunque considerados factores externos, deben considerarse para que la explotación se sujete a la normativa establecida para el ejercicio de la minería en Colombia, según la Ley 685 de 2001, de modo que respete las disposiciones que rigen para los parques nacionales y las reservas de comunidades indígenas.



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

Fuente: Becerra (2009)

2.1.2.2. Normativa sobre los ensayos de la piedra natural

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

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

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

Algunas de las normas armonizadas europeas son las siguientes:

Normas de ensayos de productos finalizados

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

Ensayos de caracterización de piedra natural

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

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

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

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

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

2.2. Tipo de depósito

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

2.2.1. Rocas ígneas

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

Las rocas ígneas con poco contenido de sílice (menos del 52 %), denominadas *rocas básicas*, son ricas en calcio, magnesio y hierro, y por lo general presentan una coloración predominantemente oscura. Las rocas ígneas ricas en sílice (mayor del 66 %), denominadas *rocas ácidas*, tienen alto contenido de sodio y potasio, y se caracterizan por sus colores relativamente claros. Las rocas con un contenido de sílice que fluctúa entre el 52 y 66 % se clasifican como intermedias, y están representadas por la diorita, la monzonita y la sienita. Otro grupo importante son las rocas

ígneas ultrabásicas, caracterizadas por contener menos del 45 % de sílice y carecer de feldespatos y cuarzo. Las más representativas de este grupo son la dunita y la peridotita. La dunita es rica en olivino magnésiano, y la peridotita, en olivino. Estas rocas pueden contener otros minerales máficos y, dependiendo de su contenido, reciben igualmente el nombre asociado, por ejemplo peridotita de piroxeno (rica en piroxeno), peridotita de hornblenda (rica en hornblenda) y peridotita de mica (kimberlita).

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

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

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

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

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



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

Fotografía: Jair Ramírez, SGC



Figura 9. Imagen de lava

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Rippled_Dry_Lava_Flow_%28282386887888%29.jpg

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

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

2.2.2. Rocas metamórficas

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

De acuerdo con las condiciones de temperatura y presión, se producen diferentes grados de metamorfismo, clasificados como muy bajo, bajo, medio y alto. El metamorfismo puede tener lugar en una gran variedad de ambientes dentro de la corteza, por lo que es conveniente identificarlos y establecer su grado, para situar y predecir la aparición de rocas ornamentales, como pizarras, mármoles y otras

rocas. Los tipos de metamorfismo se podrían dividir en dos concepciones: uno de extensión con carácter local, y otra de extensión con carácter regional. Así, se establece un metamorfismo de contacto, o térmico, otro denominado *dinámico* o *cataclástico*, otro más llamado *hidrotermal local* y, por último, el metamorfismo regional (López, 1996).

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

2.2.3. Rocas sedimentarias

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

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

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

Según F. W. Clarke, existen cerca de 370 km³ de rocas sedimentarias, que representan el 5 % del volumen total de la corteza terrestre (López, 1996).

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

2.3. Métodos de prospección

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

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

2.3.1. Fase 1. Recopilación de información y bibliografía

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

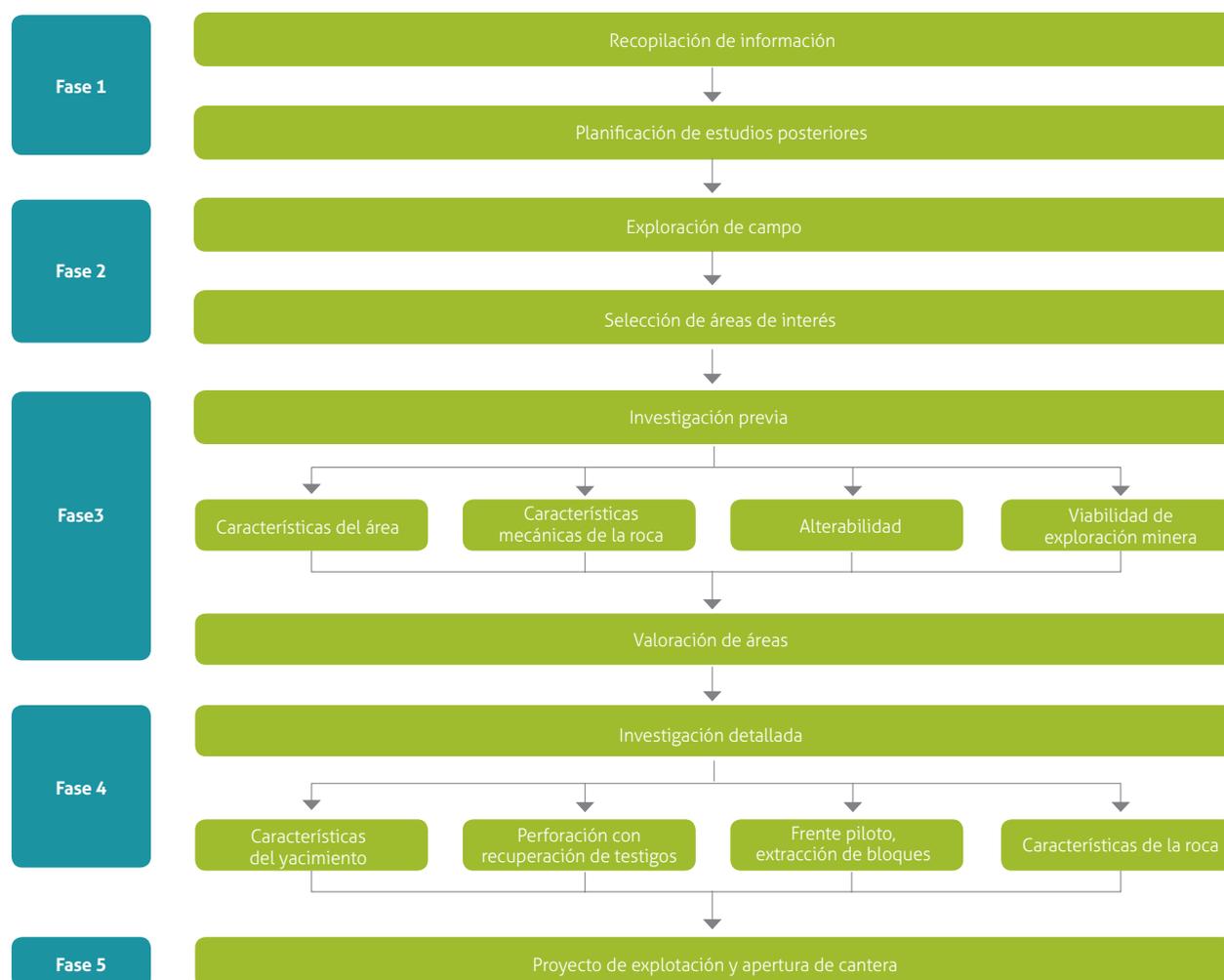


Figura 10. Fases del trabajo de investigación para la puesta en marcha de una cantera de rocas ornamentales

Fuente: López (1996)

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

2.3.2. Fase II. Exploración de campo

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

2.3.3. Fase III. Investigación previa o semidetallada

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

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

2.3.4. Fase IV. Investigación de detalle

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

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

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

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

2.3.5.1. Propiedades específicas de los afloramientos

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

2.3.5.2. Factores condicionantes de la explotabilidad

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

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

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

2.4.1. Sistemas de explotación

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

2.4.1.1. Canteras a cielo abierto

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

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

2.4.1.2. Minería subterránea

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

2.4.2. Procesamiento del material

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

2.4.2.1. Sistemas y técnicas de arranque

En la selección de los equipos para iniciar los procesos de arranque se consideran algunos factores intrínsecos de las

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

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

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

Longitud: 1.90-3.30 m, ancho: 1.00-1.50 m, altura: 0.90-1.20 m, volumen: 2.00-6.00 m³ y peso: 10-20 toneladas.

Con estos parámetros, los más apreciados y mejores pagados son los de mayor tamaño, los de mejor escuadrado y los que presentan mejor acabado de las caras, ya que estos factores implican un mejor rendimiento de transformación en los aserraderos. En general, alcanzan unos volúmenes de 6 m³ y hasta 20 toneladas de peso, y se pueden comercializar y exportar en esas condiciones a grandes distancias, debido a sus altos precios.

2.4.2.2. Técnicas de corte

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

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

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

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

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



Figura 11. Esquema de arranque por perforación de barrenos

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

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

Se han hecho notables avances tecnológicos en esta técnica de extracción, gracias a la sustitución de la perforación neumática por la hidráulica, con una operación centralizada de las baterías, que permite el control de varias baterías en paralelo por un solo operario en condiciones

de mayor productividad, menores consumos energéticos y un menor impacto ambiental derivado de los ruidos y el polvo, y que posibilita obtener un mejor paralelismo entre los barrenos.

La operación se inicia con el corte de un gran bloque, cuyo volumen puede estar entre los 100 y los 4000 m³. En una segunda etapa, sobre el gran bloque extraído se realiza la subdivisión en bloques de menor tamaño, en el mismo sitio de la cantera. Los parámetros de perforación son similares, aunque las fases sucesivas de división del bloque exigen un cuidado mayor para una mejor terminación de las caras. El volumen de los nuevos bloques obtenidos oscila entre los 18 y 100 m³. Para la ejecución del volcamiento de estos grandes bloques cuando se han individualizado es necesario disponer de un “lecho” de arena y fragmentos existentes, o en su defecto de un colchón de goma inflable que amortigüe la caída y evite rupturas o fracturaciones.

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

Continuando con las actividades se llega a la fase III, en la que se desarrollan nuevas subdivisiones de los bloques anteriores, de tal manera que estos sean más manipulables por los equipos de la cantera. El volumen general de estos bloques debe ser de unos 10 m³, que facilita el manejo y transporte a los talleres. Asimismo, estos bloques deben alcanzar las dimensiones adecuadas para su comercialización, ya sea en bruto o elaborado, teniendo en cuenta la calidad de la roca y la tolerancia final exigida por el mercado. La calidad del acabado de las caras del bloque final depende del correcto alineado de la perforación, así como de la separación y diámetro de los barrenos. Es casi imprescindible que estas imperfecciones no existan, ya que derivan del sistema en sí mismo. Tal situación supone unas pérdidas en detritus estimadas en unos 25-50 mm por cada una de las caras del bloque.

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

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

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

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

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

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



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

Fuente: Becerra (2009)

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

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



Figura 13. Fotografía de corte con rozadora de brazo

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

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

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

Su limitación viene dada por esta fórmula:

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

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

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

El corte con lanza térmica (*flame jet*) es una técnica que depende fundamentalmente de la capacidad de una roca de fracturarse en escamas en presencia de una fuente de calor, por la diferencia de conductividad térmica de los minerales constituyentes de la roca; entre estas se encuentran el cuarzo, el feldespato y la mica. Tal característica se denomina *factor de decrepibilidad* o *spallability*, y es una función del contenido de SiO₂.

El sistema consta de una lanza de longitud variable, de acuerdo con la longitud de la zona que hay que cortar, por cuyo interior discurren tres canalizaciones concéntricas de combustible, oxidante y agua, que desembocan en una tobera o cámara donde se produce la combustión. Las ondas de choque térmico generadas por la combustión son conducidas al exterior a través de una tobera a velocidades supersónicas, que producen el proceso de calentamiento,

con posterior e inmediato enfriamiento por la salida del agua o vapor procedente de la refrigeración y por los gases de escape, para producir posteriormente, por el fuerte contraste térmico, la fracturación y la expulsión de los componentes del granito en granos diferenciales en forma de decrepitación. Este método tiene desventajas ambientales, por su elevado nivel de ruido, y tecnológicas, por no ser suficientemente económico, y porque la roca presenta baja calidad en la cara de corte, afectada por fisuras y vitrificación, ambos aspectos indeseables.

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

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

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

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

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

Tabla 2. Técnicas de extracción y corte de rocas ornamentales

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

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

Fuente: Pla y Herrera (2002)

2.5. Recursos, reservas y comercio

Según Montani (2015, en IGME, 2016) la extracción mundial de rocas ornamentales aumentó un 3.85 % en 2014, hasta alcanzar 103.5 millones de m³ (en bruto, incluyendo los desechos de la producción). Calculado con base en placas de 2 cm grosor, correspondería a 1500 millones de m². Visto a largo plazo, el sector muestra una tendencia posi-

tiva: en los últimos veinte años, el comercio internacional de piedra se ha cuadruplicado. La tabla de los grandes productores muestra que, esencialmente, los gigantes del sector son China, India y Turquía. Es destacable el hecho de que aumenta continuamente en el comercio internacional la parte que corresponde a productos acabados. En la tabla 3 se observan las producciones mundiales de rocas ornamentales en miles de toneladas en el periodo 1996-2014.

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

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

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

El mayor consumo de rocas ornamentales, según estimaciones de Montani (2015, en IGME, 2016) está encabezado por China, muy por encima de India, EE. UU., Brasil, Italia, Corea del Sur, Alemania y Turquía, a los que se les

atribuye más de dos millones de toneladas en 2014, como se ve en la tabla 4. Les siguen Francia, Taiwán, España, Japón, Canadá y Bélgica con un consumo superior o cercano a un millón de toneladas anuales.

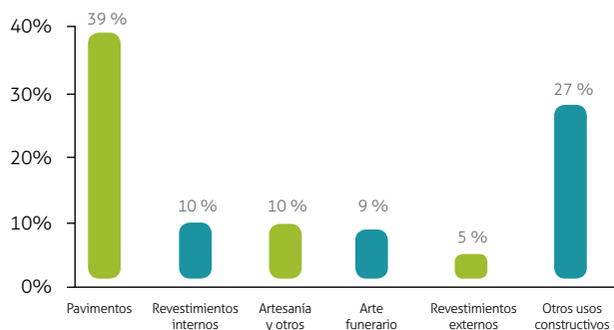
Tabla 4. Exportaciones internacionales de materiales lapídeos, en bruto y elaborados

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

Fuente: Montani (2005, en IGME, 2016)

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

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


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

Fuente: IGME (2016)

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

Según la asociación Internazionale Marmi e Macchine (IMM) (Internazionale Marmi e Macchine Carrara y Gussoni, 2015, en IGME, 2016), la piedra natural registró un comercio mundial de 86 millones de toneladas (+ 7.4 % respecto a 2013), por un valor de 22.8 billones de euros (+ 1.8 %), con una estabilización de las cuotas de mercado entre los diez primeros países, pero con interesantes variaciones en los porcentajes. China mantiene la mayor

cuota del mercado internacional con un 35.8 % del valor total (principalmente comercia con Japón y los países de la zona), seguido por Italia con un 13.5 %, que cuenta con un mercado estable en términos de productos terminados de alto valor añadido. Turquía, el tercero en el mercado, con un 12.1 % (baja consistentemente en comparación con el 12.9 % de 2013), seguido por la India (10.8 %) y Brasil con 7.0 %. España, con un 4.4 % del valor de las exportaciones mundiales en 2014, ocupa la sexta posición.

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

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

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

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

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

Fuente: Gussoni (2015, en IGME, 2016)

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

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

2.6. Perspectivas

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

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

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

dependiendo del papel protagónico de los grandes países productores, los cuales tienen la tecnología apropiada para la transformación de los materiales en bruto.

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

3. Rocas ornamentales en Colombia

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

3.1. Geología regional

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

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

3.2. Geología local

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

Como se anotó anteriormente, en Colombia se han originado diversos tipos de rocas a lo largo de su historia

geológica, razón por la cual en los estudios regionales se mencionan aquellos lugares geográficos más conocidos, donde se ha reportado la presencia de rocas potencialmente aplicables a la industria de rocas ornamentales.

3.2.1. Región atlántica

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

El Gobierno nacional, por intermedio de Ingeominas, adelantó una exploración básica entre los departamentos del Cesar y La Guajira. En cumplimiento de las actividades de campo se determinaron cuatro sectores de interés, denominados, de sur a norte, Bosconia-Copey, María Angola-Valledupar, Patillal-Badillo y Atánquez-Cuestecita, donde son evidentes los eventos magmáticos, plutónicos, hipoabisales, efusivos y explosivos, la presencia de rocas sedimentarias detríticas y no detríticas, y los depósitos aluviales recientes. El batolito de Patillal se consideró una estructura de interés para la explotación de rocas ornamentales. El batolito está constituido por una roca granítica a cuarzomonzonítica hornbléndica y biotítica de color rosado, textura fanerítica, holocristalina de gruesa a muy gruesa, donde se ubica un área como blanco de exploración denominado Caracolí, en el que además se definieron reservas inferidas para tres sectores (Patillal, Socola y Palomas), del orden de los 112 millones de m³ (Bernal, 2004).

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

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



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

Fuente: Cárdenas, Pulido y Valderrama (2001)

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

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

3.2.2. Región andina

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

En la localidad de Puerto Triunfo, jurisdicción del corregimiento de Doradal (Antioquia), se ubica un gran depósito de calizas cristalinas y mármoles de edad Paleozoica, explotados por la Compañía de Cementos Río Claro. El material extraído se utiliza para la producción de cemento y para la extracción de material ornamental. En el caserío de La Danta, distante 12 kilómetros de la planta de cemento, existen varias explotaciones de tipo artesanal que producen rajón y bloques de menores dimensiones, usados

en el mercado de lápidas (Cárdenas *et al.*, 2001). Por otra parte, en los municipios de Valdivia y Yarumal (Antioquia) se explota la piedra Valdivia. El yacimiento consta de filitas y esquistos verdes incluidos en el grupo Valdivia, de edad Paleozoica (Rodríguez, 2002).

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



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

Fuente: Cárdenas *et al.* (2001)

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

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

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

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

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



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

Fuente: Cárdenas *et al.* (2001)

En este departamento también se explotan rocas metamórficas, más exactamente un depósito de serpentina ubicado en el municipio de Ibagué, en la vereda La María. La serpentina deriva de la alteración de un cuerpo ultramá-

fico emplazado tectónicamente entre esquistos verdes cloríticos-actinolíticos pertenecientes al grupo Cajamarca, de edad Paleozoico. El depósito está relacionado con una zona de falla, y presenta alteraciones a talco. El cuerpo es masivo en el centro y fracturado en los bordes, según el Inventario Minero Nacional (1995, en Cárdenas *et al.*, 2001).

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

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

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

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

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

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

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

En el departamento de Nariño, la principal fuente de materiales para ornamentación la constituyen los depósitos volcánicos, que van desde el Terciario hasta el Reciente, y que están distribuidos ampliamente como material de relleno en extensas depresiones y antiguos valles y terrazas. En los municipios de Ipiales, Pasto, Cumbal y Potosí

se extrae rajón para ornamentación, proveniente de las secuencias de lavas interstratificadas con flujos piroclásticos, cenizas, aglomerados y otros depósitos originados por actividad volcánica, así como en los flujos de escombros, lahares y terrazas recientes (Ingeominas, 1995).

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



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

Fuente: Becerra (2009)

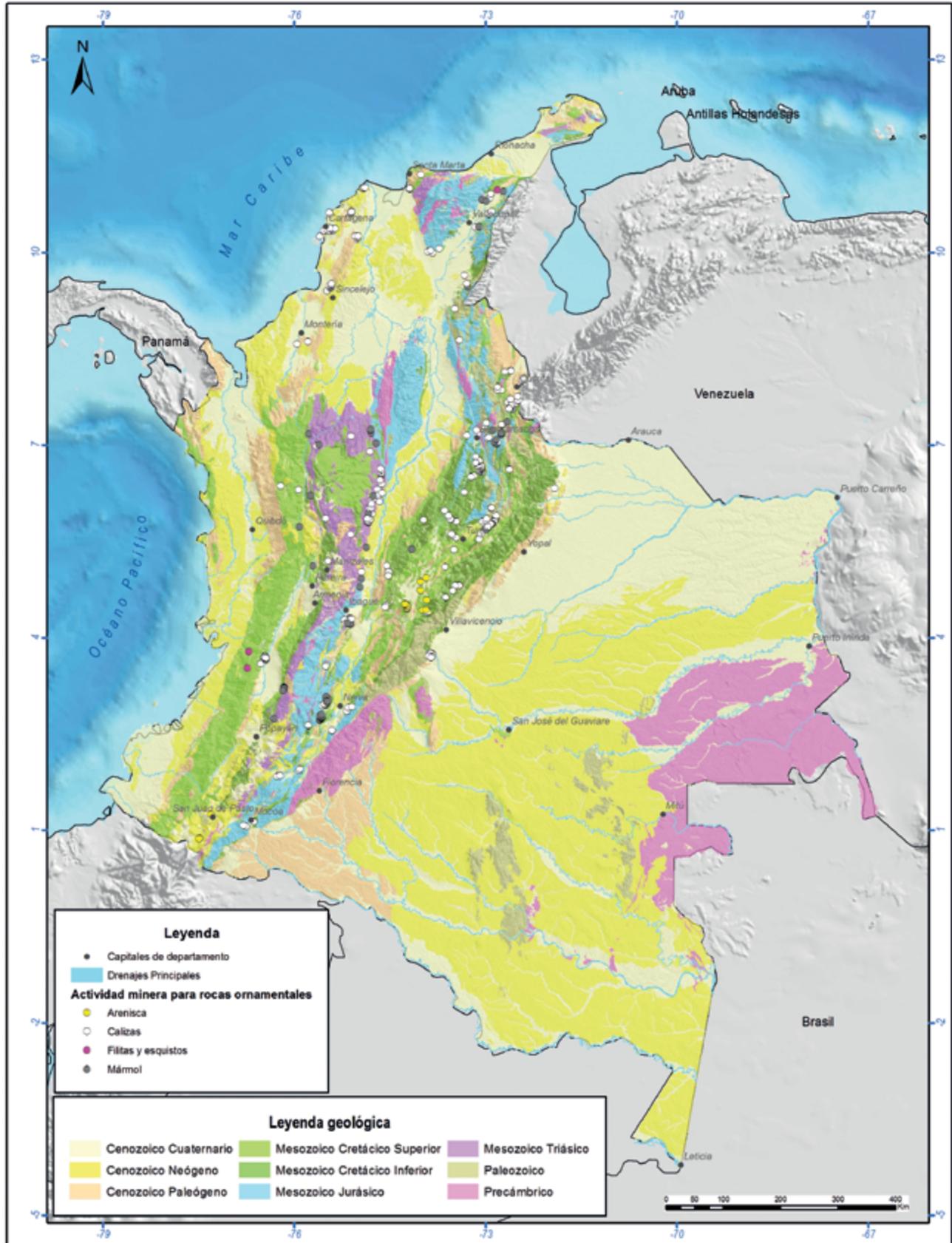


Figura 19. Actividad minera relacionada con rocas ornamentales en Colombia

Fuente: ingeominas (1994-2002)

Como puede verse, las rocas ornamentales se explotan poco en Colombia, y se aprovecha una pequeña variedad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. No obstante, el país tiene un gran potencial de rocas ornamentales debido a la complejidad de eventos geológicos que caracterizan la geología colombiana. Los macizos de Santander y Floresta, los batolitos de la cordillera Central, las rocas precámbricas del Escudo Guayanés, además de las formaciones sedimentarias Paleozoicas, Meso y Cenozoicas, ofrecen un gran potencial

que debe explotarse. Los resultados del proyecto Exploración de Materiales Lapidarios en la Sierra Nevada de Santa Marta muestran que en el departamento del Cesar se encuentran rocas metamórficas e ígneas con características apropiadas para continuar con el proceso de investigación geológica detallada y con su caracterización. Se identificaron características fundamentales, como el color, calidad del brillo y sus características geomecánicas (tabla 6), que las hacen aptas para el desarrollo de un polo extractivo en esta región.

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

Caracterización tecnológica						
Tamaño del grano	Fino	Fino	Fino	Fino	Fino	Fino
Porosidad abierta	1.00 %	1.70 %	1.00 %	1.00 %	2.60 %	1.30 %
Densidad aparente (kg/m ³)	2600	2570	2790	2600	2520	2680
Resistencia al desgaste por rozamiento (mm)	3.3	2.96	1.9	3.3	3.05	1.72
Resistencia a la compresión (Mpa)	154	164	203	154	190	196
Resistencia a la flexión (Mpa)	18 275	26 372	15 466	18 275	29 868	31 300
M. dureza Knoop (Mpa)	2478	1470	1587	2478	1965	1543
Resistencia al choque (cm)	37.5	52.5	40	37.5	45	49
Absorción de agua por capilaridad (g/m ² .S ^{1/2})	0.537	0.586	0.262	0.537	1.376	0.531
Resistencia a las heladas (pérdida de masa)	0.056	0.044	0	0.056	0.32	0
Resistencia a la cristalización de sales	0.15	0.1	0.09	0.15	0.05	0.37
Absorción agua a presión atmosférica	0.2	0.4	0.2	0.2	0.7	0.3

Fuente: Bernal (2004)

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

3.3. Situación actual de la minería

El desarrollo de las rocas ornamentales en Colombia es muy incipiente, poco especializado y se limita a producir

piezas de pequeñas dimensiones que se comercializan en mercados locales de la industria de la construcción. Los productos provenientes de las actividades mineras obtenidos mediante el laboreo mecánico o manual son comercializados en Colombia con unos nombres informales, como puede observarse en la tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones de algunas rocas ornamentales de Colombia

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

Fuente: Rodríguez (2002)

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

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

3.3.1. Potencial

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

3.3.2. Comercio

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

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

producirse industrialmente plaquetas de algunas variedades de piedra bogotana.

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

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

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

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

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

registran las exportaciones de rocas ornamentales durante el periodo 2010-2016. Allí puede observarse que hay una notable recuperación en el sector, luego de un descenso

drástico ocurrido en el año 2013. Este es otro motivo más para intensificar los procesos exploratorios en este tipo de depósitos.

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

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

(.../...)

(.../...)

Año	Minerales no metálicos de uso industrial	Mineral	Unidad de medida	Cantidad por mineral
2017	Rocas ornamentales	Granito (bloque mayor o igual a 1 m ³)	m ³	ND
		Granito (bloque menor a 1 m ³)	m ³	
		Mármol (bloque mayor o igual a 1 m ³) y travertino en bloque	m ³	ND
		Mármol (bloque menor a 1 m ³)	m ³	25 339.15
		Piedra arenisca o piedra bogotana	m ³	ND
		Roca coralina (bloque mayor o igual a 1 m ³)	m ³	257.00
		Roca coralina (bloque menor a 1 m ³)	m ³	ND
		Serpentina (bloque mayor o igual a 1 m ³)	m ³	681.29
		Serpentina (bloque menor a 1 m ³)	m ³	1 511.00
		Travertino y calizas cristalinas en bloque mayor o igual a 1 m ³	m ³	20.00
		Travertino y calizas cristalinas en bloque menor a 1 m ³	m ³	74.00
		Serpentina en rajón	t	ND
		Silicato de magnesio	t	

ND. No se tiene información de producción hasta la fecha

Fuente: UPME (2017); ANM (2018)

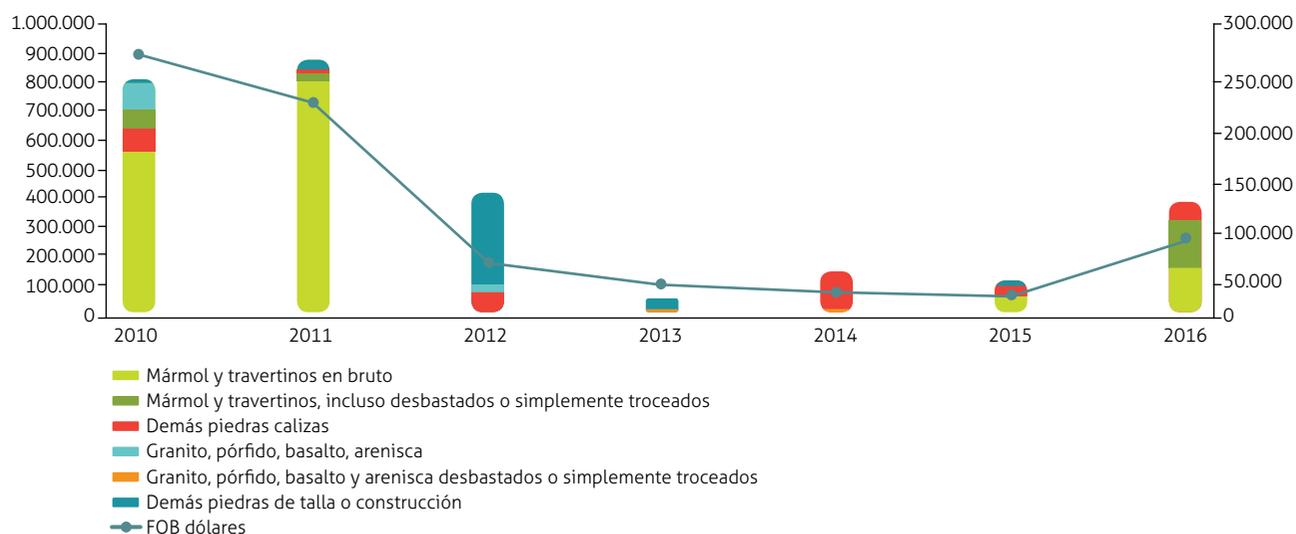


Figura 20. Exportaciones de rocas ornamentales en el periodo 2010-2016

Fuente: UPME (2017)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Desde el punto de vista del medio ambiente, la industria de las rocas ornamentales, al igual que la de las arenas, grava y arcillas, tiene características generales muy similares y las normativas, tanto del Ministerio de Minas y Energía como las del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y del de Vivienda, Ciudad y Territorio, prácticamente son las mismas. Como política preventiva y paliativa se propone

que las empresas, tanto en la actividad de extracción como en la industrial, traten de adoptar la cultura fundamentada en que, así como la naturaleza permite el aprovechamiento de sus recursos, de la mejor manera posible hay que restituírle su forma paisajística inicial y reponer las fuentes de agua, con el fin de que se desarrollen nuevos suelos y nueva vegetación.

Bibliografía

- Alfaro, A., Gallardo, W., Mantilla, D., Mosqueira, P. y Yopla, M. (2016). Rocas ornamentales. En Filadelfio Cruzado (coord.), *Minería no metálica*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca. Disponible en <https://www.slideshare.net/PAOLAMOSQUEIRAVILLAR/capitulo-vii-rocas-hornamentales>. Consultado el 5 de marzo de 2018.
- ANM (2018). *Así se movieron las cifras de producción de minerales en 2017*. Disponible en <https://www.anm.gov.co/?q=asi-se-movieron-las-cifras-de-produccion-de-minerales-en-2017>.
- Becerra, J. (2009). Caratterizzazione fisica e chimica e diagnostica del processo di deterioramento delle calcaree della formazione La Tampa usate nelle architetture di Medellín (Colombia). En *Formazione Avanzata nel Settore delle Rocce Ornamentali e delle Geolaborazioni*. Boloña: Asterisco Edizioni.
- Becerra, B. y Costa, A. (2008). *Rochas sedimentares com fins ornamentais: os exemplos dos calcários da formação La Tampa (Colômbia) e do arenito Pietra Serena da formação Mar-noso-Arenácea (Italia)*. III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais e IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Rio de Janeiro.
- Becerra, J. (2009). *Avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários ornamentais da formação La Tampa usados na construção civil de Medellín-Colômbia* (tesis doctoral). Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Becerra, J., Montaña, J., y Escobar, I. (2011). *Unidades geológicas con potencial para rocas ornamentales den los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Sur de Santander*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Bernal, L. (2004). *Exploración regional de rocas ornamentales entre el municipio de Valledupar y las inspecciones de Patillal y Badillo, departamento del Cesar*. Bogotá: Ingeominas.
- Cárdenas, J., Pulido, O. y Valderrama, M. (2001). *Explotaciones de piedras ornamentales en Colombia*. Bogotá: Ingeominas. Disponible en <http://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=4632>
- Chiodi, C. (2010). *Exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento. Variação percentual em peso e valor no período janeiro-maio 2010*. Abirochas.
- Del Monte, M. (2006). La durabilidad de las piedras instaladas. El geólogo de Emilia- Romagna. *Boletín oficial de información de la orden de geólogos de la región Emilia- Romagna*, VI(23), 7-32.
- Frazão, B. (2002). *Tecnologia de rochas na construção civil*. Sao Paulo: Associação Brasileira de Geologia, de Engenharia e Ambiental.
- Higuera, P. y Oyarzun, R. (1998). *Minerales y monumentos*. Madrid: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Hinojosa, J. (2005). *Cuellos volcánicos*. Quito: Ciencia.
- IGME (2016). *Panorama minero*. Disponible en http://www.igme.es/PanoramaMinero/PANORAMA_MINERO_2016.pdf.
- Ingeominas (1994-2002). *Inventario minero, geológico y ambiental*. Bogotá.
- Ingeominas (1995). *Inventario minero de Nariño*. Bogotá.
- Ingeominas (1996). *Inventario minero del Tolima*. Bogotá.
- Ingeominas-Minercol. (2004). *Aprovechamiento de materiales lapidarios en la Sierra Nevada de Santa Marta, departamentos del Cesar y la Guajira. Informe final*. Bogotá: Ingeominas.
- López, J. (1996). *Manual de rocas ornamentales*. Madrid: Gráficos Arias Montano Mostoles.
- Pla Ortiz de Urbina, F. y Herrera, H. (2002). *Laboreo minero: curso de laboreo I*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rock Classification: sedimentary rocks, igneous rocks, and metamorphic rocks* (s. f.). Disponible en <https://spark.adobe.com/page/0ryZTl2LaV4jl/>.
- Rodríguez, A. (2002). *Mapa de minerales industriales, zonas potenciales para materiales de construcción*. Bogotá: Ingeominas.
- Universidad Nacional de Cajamarca. (2016). *Rocas ornamentales*. Disponible en <https://www.slideshare.net/PAOLAMOSQUEIRAVILLAR/capitulo-vii-rocas-hornamentales>
- Universidad Politécnica de Madrid. (2017). *Explotaciones de roca ornamental: diseño de explotaciones y selección de maquinaria y equipos*. Disponible en http://oa.upm.es/21840/1/071120_L3_ROCA_ORNAMENTAL.pdf.
- UPME (2017). *Informe de producción anual: minerales industriales (informe interno)*. Bogotá.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, H. 1973. *Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander*. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-132.
- Zapata, E. (2016). *Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia*. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.