

Esmeralda
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Esmeralda

Diana Montoya y Giovanni Moreno

Citación: Montoya, D. y Moreno, G. (2019). Esmeralda. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

1. Usos

La esmeralda es una de las gemas más preciadas del mundo por su belleza, derivada de su color, brillo y dureza, la cual se aumenta por medio de la talla, que le imprime fuego y vida (términos utilizados por los gemólogos).

Esta piedra se ha usado desde la antigüedad como joya de adorno personal en anillos, cadenas, brazaletes o collares. Los nativos precolombinos las utilizaron para decorar diversos objetos, algunos de los cuales se exhiben en el Museo del Oro, en Bogotá, Colombia.

La esmeralda es una de las piedras preciosas más bellas y valoradas del mundo, junto con el diamante, el rubí y el zafiro. Las esmeraldas de poca calidad tienen colores claros e impurezas, y se les llama morrallas; se emplean para decorar artesanías, y se usan en combinación con el berilio en aleaciones con el cobre, puesto que aumentan su dureza y la resistencia a la tracción.

Los descubrimientos arqueológicos han evidenciado claramente que nuestros antepasados precolombinos coleccionaban y atesoraban gemas por su belleza. Incluso se ha encontrado relatos en los que se describen cómo se las trataba para aumentar su belleza —y por ende su valor—, y cómo se podían taladrar para utilizarlas en collares y brazaletes (Hurlbut y Klein, 1984).

En Egipto, antes del periodo predinástico (5000-3000 a. C.), se emplearon varios minerales con fines ornamentales, entre estos el cuarzo en distintas variedades, turquesa, crisocola, olivino, fluorita y malaquita. La esmeralda también fue una gema muy conocida por los egipcios primitivos y, a diferencia de las otras gemas, cuya fuente es desconocida, los primeros yacimientos estaban situados en los montes Sahara, en Egipto septentrional, junto al mar Rojo. En la actualidad hay vestigios de las antiguas actividades mineras (Hurlbut y Klein, 1984).

En Colombia los españoles fueron los primeros en localizar las minas conocidas con el nombre de Chivor, en las montañas de Somondoco ("dios de las piedras verdes", en lengua chibcha), las cuales fueron explotadas hasta 1564, cuando el capitán Juan de Penagos descubrió las minas de Muzo, que relegaron a las de Chivor por su mayor importancia (Martín de Retana y Moller, 1990).

Sin embargo, los indígenas ya explotaban estas minas de manera artesanal antes de ser descubiertas por el capitán Juan de Penagos, y en 1567 empezó su explotación por parte de los españoles en la quebrada de Itoco, con la dirección de Benito de Poveda (Martín de Retana y Moller, 1990).

Los españoles descubrieron las minas de Coscuez (nombre de una princesa india) en 1646, las cuales fueron abandonadas y redescubiertas en 1850; a partir de este año se trabajaron con interrupciones hasta 1905, cuando pasaron a ser propiedad de la nación colombiana (Martín de Retana y Moller, 1990).

Las minas de Muzo, Coscuez y Peñas Blancas se cedieron al Banco de la República de Colombia para su explotación en 1947; en 1969 se extrajeron de Muzo bellas colecciones que pertenecen al Banco de la República (Martín de Retana y Moller, 1990).

En 1955 el Gobierno colombiano le pidió al Comité de Minas del Banco de la República suspender la explotación de esmeraldas, con el propósito de mecanizar dicho proceso y realizar estudios de las minas (Sinkankas y Calzada, 1990, citados en Martín de Retana y Moller, 1990). El Banco de la República entregó al Gobierno la administración y explotación de las minas de Muzo y Coscuez en 1966, y a partir de esta fecha, hasta la creación de la Empresa Colombiana de Esmeraldas en 1968, se produjeron invasiones en los frentes de explotación. En diciembre de ese mismo año la empresa cambió de nombre a Ecominas, cuya función principal era atender la comercialización de esmeraldas, piedras preciosas y semipreciosas (Sinkankas y Calzada, 1990, citados en Martín de Retana y Moller, 1990).

Posteriormente se liquidó Ecominas y se creó Minercol, cuyas funciones fueron delegadas por el Ministerio de Minas y Energía a Ingeominas, y posteriormente a la Agencia Nacional de Minería (ANM), institución que desde ese

momento se ha hecho cargo del catastro minero y de la fiscalización de las minas del país.

2. Ambiente geológico

El berilio es un elemento perteneciente al grupo alcalinotérreo, bivalente, tóxico, de color gris, duro, ligero y quebradizo. Tiene uno de los puntos de fusión más altos entre los metales ligeros y resiste la oxidación del aire. El ^{9}Be es el único isótopo estable y lo descubrió Vauquelin en 1798 en forma de óxido; tiende a formar sales con los halógenos. El mineral berilo es un ciclosilicato de berilio y aluminio, cuya variedad de color verde se conoce como esmeralda (Hurlbut y Klein, 1984).

2.1. Características

La esmeralda es una variedad de color verde del mineral berilo, el cual corresponde a un silicato de estructura anular del grupo de los ciclosilicatos que están formados por anillos de tetraedros de $(SiO_4)^{4-}$ enlazados, con una relación Si:O = 1:3 (Hurlbut y Klein, 1984) (figura 1), de la cual el anillo $(Si_6O_{18})^{12-}$ es el armazón básico del berilo.

El berilo cristaliza en la holoedría del sistema hexagonal ($6/m^2/m^2/m$), presentando por tanto la mayor simetría dentro del sistema y todos los elementos cristalográficos son los siguientes: un eje de simetría hexagonal (1A6), seis ejes de simetría binarios (6A2) y siete planos de simetría (7 m). La relación entre sus ángulos es $\alpha = \beta = 90°$, $\gamma = 120°$, y entre sus lados es $a = b \neq c$ (Hurlbut y Klein, 1984) (figura 2).

El berilo presenta hábito prismático claro, a menudo estriado verticalmente y ranurado (figura 3). Las formas más comunes en los cristales corresponden a prismas de primer orden, prismas con facetas piramidales y prismas dihexagonales (figura 4) (Hurlbut y Klein, 1984).

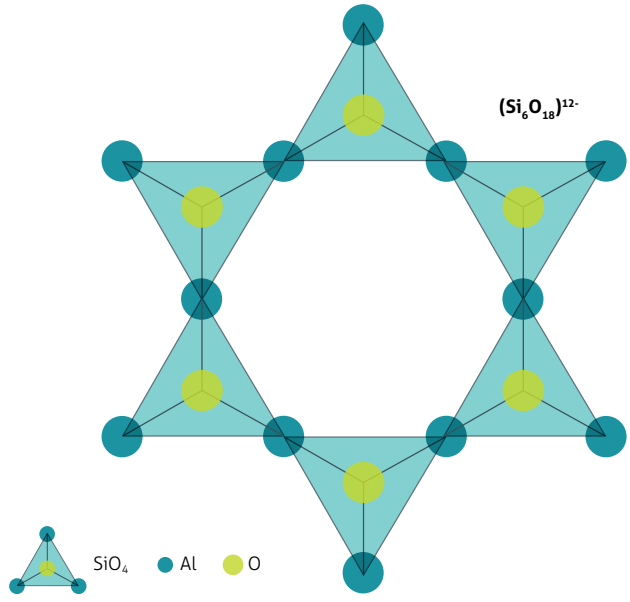


Figura 1. Estructura de un ciclosilicato

Fuente: modificado de Hurlbut y Klein (1984)

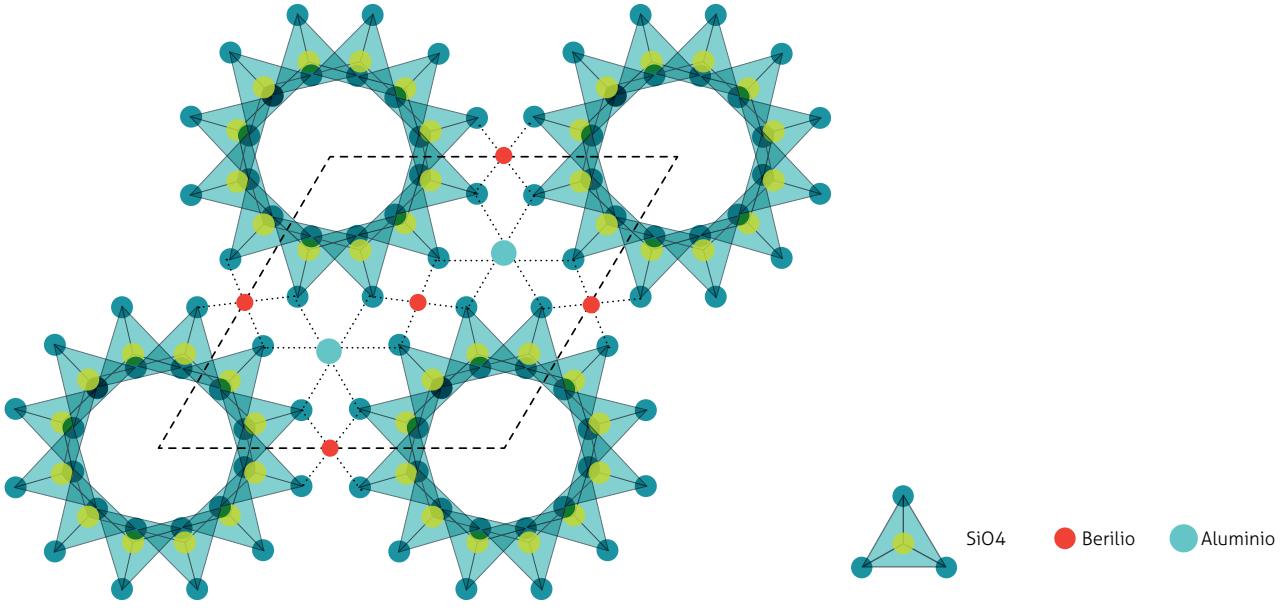


Figura 2. Estructura cristalina del berilo

Fuente: modificado de Hurlbut y Klein (1984)

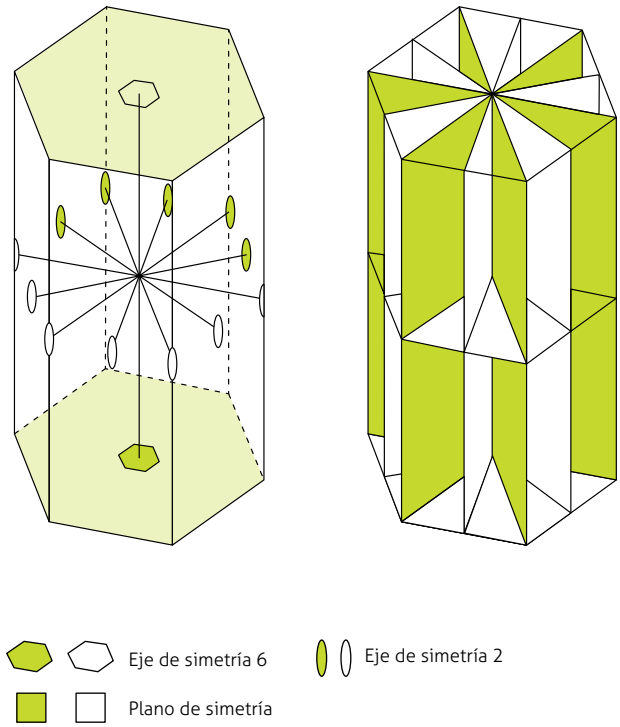


Figura 3. Elementos de simetría de un cristal de berilo hexagonal
Fuente: modificado de Hurlbut y Klein (1984)

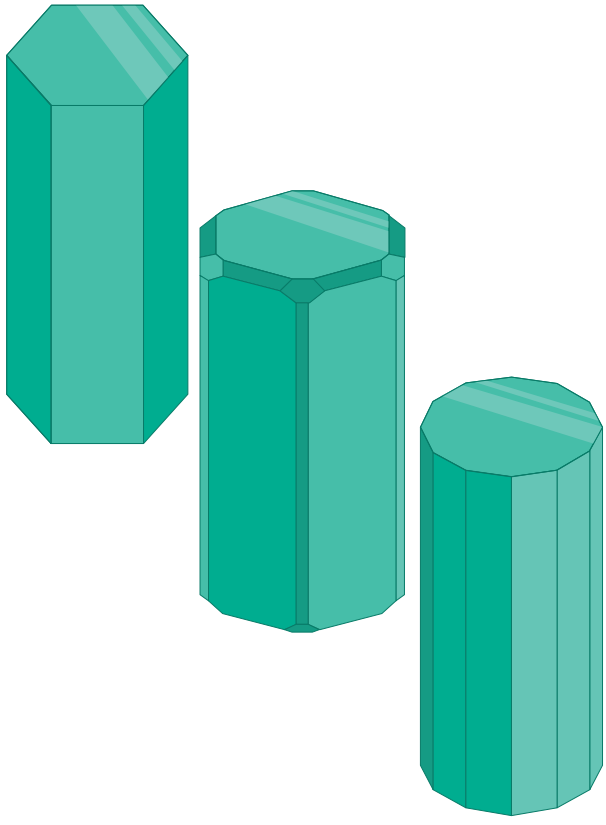


Figura 4. Cristal de berilo típico. Prisma hexagonal
Fuente: Modificado de Hurlbut y Klein (1984)

2.2. Propiedades físicas y químicas de la esmeralda

La esmeralda presenta exfoliación {0001} imperfecta, principalmente a través de su eje más largo (eje c). La dureza es de 7.5-8 en la escala de Mohs y la gravedad específica es de 2.65-2.80. Tiene brillo vítreo y su color es verde (Hurlbut y Klein, 1984). El color la distingue de las otras variedades del berilo (figura 5), así:

- *Goshenita*. $Be_3Al_2(SiO_3)_6$. Berilo incoloro, transparente.
- *Aguamarina*. $Be_3Al_2(SiO_3)_6$. Berilo transparente, azul verdoso.
- *Morganita*. Berilo rosa pálido a rosa naranja.
- *Esmeralda*. $Be_3Al_2(SiO_3)_6$. Berilo transparente, verde oscuro.
- *Heliodoro*. $Be_3Al_2(SiO_3)_6$. Berilo dorado, variedad amarillo oro.
- *Bixbita*. $Be_3(Al,Mn)_2(SiO_3)_6$. Berilo rojo.

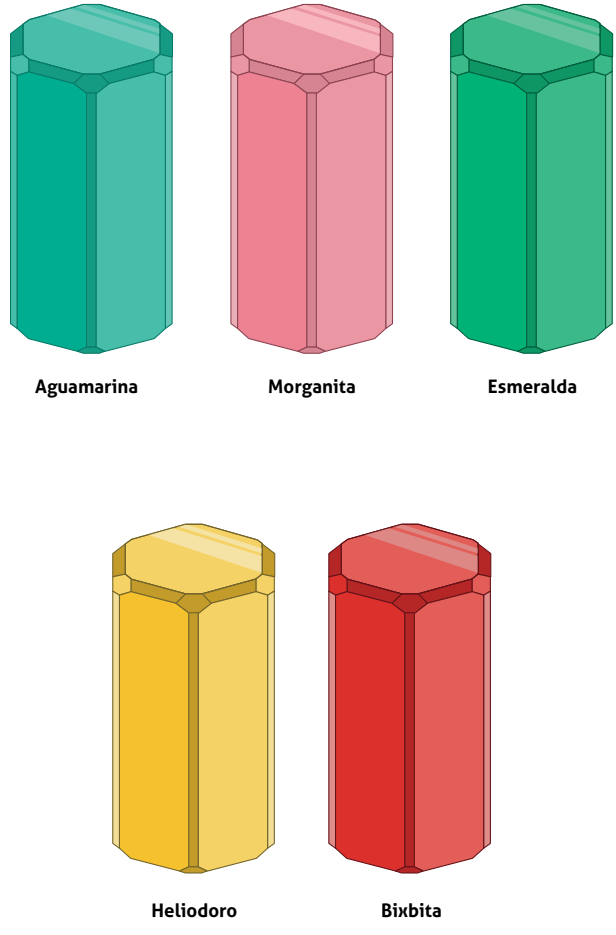


Figura 5. Clasificación de cristales de berilo según su color
Fuente: modificado de Hurlbut y Klein (1984)

El berilo presenta doble índice de refracción por ser un cristal dicroico (el cristal tiene diferentes colores en distintas direcciones de vibración), los cuales están entre 1.5566-1.608 (ω) y 1.562-1.600 (ε).

La composición química del berilo está dada por la fórmula $Be_3Al_2(SiO_3)_6$, con los siguientes porcentajes teóricos: BeO 14 %, Al_2O_3 19 %, SiO_2 67 %, Cr_2O_3 0.86 %; también presenta pequeñas cantidades de elementos alcalinos, como Na, Rb y Li, y trazas de Ce, Fe y V, que remplazan frecuentemente el berilio. Estos porcentajes varían en la práctica, como en el caso de las esmeraldas del Cinturón Esmeraldífero Occidental (tabla 1).

Tabla 1. Análisis de los principales elementos químicos de las esmeraldas de Muzo

Óxido (%)	1	2	3	4	5	6
SiO_2	64.1	61.4	65.26	65.07	61.4	65.25
Al_2O_3	24.2	24.3	17.6	18.51	24.3	17.62
BeO	8.7	9.7	13.2	12.65	9.7	13.8
H_2O	2.9	–	1.84	1.81	1.55	–
MnO	Trazas	–	0.06	0.02	–	–
Cr_2O_3	–	–	–	0.13	–	–
TiO_2	–	0.8	–	–	0.8	–
FeO-F_2O_3	–	1.2	0.002	0.72	0.54	1
V	–	–	–	–	–	–
MgO	–	–	0.002	0.24	–	–
CaO	–	–	0.09	0.65	–	–
SrO	–	–	0.015	–	–	–
BaO	–	–	0.16	–	–	–
Na_2O	–	–	0.5	0.43	–	–
K_2O	–	–	0.22	0.16	–	–
Li_2O	–	–	0.105	0.04	–	–
Total	99.9	98.4	100.56	100.48	96.74	100

Fuente: 1. Getse (Restrepo, 1961); 2. Wolbling (Restrepo, 1961); 3. Zambonini (Restrepo, 1961); 4. Tsherepivskaya, 1971 (Hall, 1976); 5. Bernawer, 1933 (Hall, 1976); 6. Barriga, 1948 (Hall, 1976)

La mayoría de los cristales de esmeraldas colombianas pueden tener algunas opacidades debido a fisuras, fracturas y a la presencia de inclusiones sólidas, líquidas y gaseosas.

2.2.1. Procesamiento de la esmeralda

Las esmeraldas, después de ser extraídas, son seleccionadas de acuerdo con su tamaño, color, brillo, inclusiones y fracturas, labor que debe ser realizada en lo posible por personal que tenga conocimiento en cristalografía, mineralogía y gemología. Posteriormente viene la etapa de diseño artístico, donde se busca un equilibrio entre el peso que se pierde en el proceso y la belleza final de la gema.

En esta etapa se toma en cuenta que la esmeralda cristaliza en prismas hexagonales, alargados con terminación basal y prismas hexagonales con facetas piramidales. Por consiguiente, el gemólogo debe escoger, junto con el tallador, la forma más adecuada que debe tener la esmeralda.

En esta etapa se debe considerar que, para realzar el brillo y darle vida a la gema, es necesario que el observador perciba los rayos de luz gracias a la disposición de los cortes y aristas, de acuerdo con la cristalografía y los índices de refracción (Romero y Rubiano, 1997).

2.2.2. Esmeraldas sintéticas

La síntesis de berilo se ha centrado directamente en la esmeralda por su alto valor comparado con el de sus otras variedades. Las esmeraldas se han sintetizado mediante métodos de crecimiento de flujo e hidrotermales; un procedimiento hidrotermal especial, conocido como proceso Lechtleitner, permite el sobrecrecimiento de esmeraldas a partir de cristales incoloros de berilo (Klein, Hurlbut y Dana, 1993).

Para distinguir las esmeraldas sintéticas de las naturales se utiliza la fluorescencia. Las esmeraldas naturales carecen de fluorescencia, pero las sintéticas usualmente lo hacen hacia rojos opacos bajo luz ultravioleta de alta longitud de onda. Las esmeraldas naturales por lo general aparecen rojas cuando se observan a través del filtro de Chelsea, mientras la mayor parte de las esmeraldas sintéticas aparecen verdes (Klein, Hurlbut y Dana, 1993).

Asimismo, hay que tener presente que la gravedad específica de las esmeraldas artificiales es de 2.65 a 2.66 y la de las naturales 2.71 (Romero y Rubiano, 1997). En un líquido pesado y ajustado a una densidad de 2.67, las sintéticas flotarán.

En general, si una esmeralda con doble índice de refracción tiene inclusiones trifásicas, índice de 1.57 o más alto, no flota en líquido de densidad de 2.67, no fluoresce a la luz ultravioleta y es opaca a las ondas cortas de luz (3000 Å), se puede tener un alto grado de certeza de que es natural (García y Vargas, 1970). Los procesos mencionados anteriormente sólo se pueden realizar en laboratorios especializados.

2.3. Tipo de depósito

Los depósitos de esmeraldas en el mundo están relacionados con diversos procesos geológicos, como magmatismo,

procesos sedimentarios o metasomatismo, y se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.3.1. Depósitos relacionados con actividad magmática (intrusiones ácidas)

Las rocas máficas y ultramáficas están enriquecidas por lo general en Cr y V. Por el contrario, las rocas suficientemente ricas en Be, Si y Al, necesarios para formar los berilos, suelen ser pegmatitas graníticas y granitos evolucionados (Recio y Subias, 2007).

El Be se concentra en los fluidos residuales de las etapas finales de cristalización de rocas ígneas intrusivas, junto con álcalis (Na_2O+K_2O), sílice (SiO_4^{2-}), alúmina (AlO_4^{2-}), tierras raras livianas, al igual que con elementos y complejos volátiles como fluoruro (F^-), hidroxilos (OH^-), carboxilos (CO_2H), boro (B) y fósforo (P) (Mulligan, 1968). De esta forma, a medida que avanza el grado de cristalización de un magma, las concentraciones de Be aumentan en el fluido residual.

En el modelo relacionado con actividad magmática, rocas ígneas intrusivas de composición félsica de las últimas etapas de cristalización (pegmatitas), asociadas a granitoides, portadoras del Be, intruyen rocas básicas a ultrabásicas en las cuales se encuentran el Cr y el V necesarios para formar la esmeralda. Los yacimientos que se ajustan a este modelo están asociados por lo regular a la intrusión de rocas graníticas en rocas encajantes, prácticamente siempre de quimismo básico a ultrabásico (Recio y Subias, 2007).

En este tipo de depósito se presentan procesos neumatolíticos, que dan lugar a yacimientos tipo greisen. Los greisen son zonas de alteración relacionadas con granitos, por intrusión de otros cuerpos, que en general afectan sectores periféricos o apicales del propio granito. En estas zonas se produce una destrucción del feldespato potásico con formación de mica blanca microcristalina (illita) y con entrada de abundante sílice que se deposita en la roca en forma coloidal (calcedonia), en lo que se denomina proceso de silicificación (Evans, 1995; Guilbert y Park, 1986).

Las pegmatitas ácidas (silíceas) están compuestas principalmente por cuarzo, microclina, albita y moscovita. Son muy importantes desde el punto de vista económico, ya que su fase magmática residual es rica en agua y produce grandes cristales de tales minerales. Los elementos mineralizantes típicos de las pegmatitas son B, F, P y S, razón por la cual son comunes minerales como berilo, turmalina, topacio, fluorita, criolita, apatito, ambligonita, siderita, columbita, tantalita, molibdeno, casiterita y minerales de tierras raras (Garcés, 1995).

Las temperaturas de formación de las esmeraldas en los yacimientos de tipo pegmatítico suelen ser superiores a los 350 °C y los datos de inclusiones fluidas indican por lo general precipitación a partir de salmueras complejas (H_2O – CO_2 ± CH_4), con salinidades del 12-40 % equivalente de NaCl (Recio y Subias, 2007). Larsen (citado en Garcés, 1995) indica temperaturas de formación a partir del estudio de inclusiones fluidas en cuarzos entre 500 y 700 °C.

A este tipo de depósito parece que corresponde el de Wodgina en Australia, donde rocas metamórficas del Precámbrico, cubiertas por arcillas, limolitas y cuarcitas, están cortadas por aplitas y pegmatitas del Plutón Mole. Las esmeraldas se han encontrado en diques alterados, greisenitizados con cuarzo, topacio, feldespato y mica en cavidades.

En Suramérica depósitos de esmeraldas relacionados con pegmatitas se encuentran en la Bahía Carnaíba (Brasil), en el contacto entre pegmatitas con serpentinitas de la Serie Jacobina en un evento ocurrido hace 1900 Ma. (Giuliani., et al, 1992).

2.3.2. Depósitos relacionados con metamorfismo regional y de contacto

Los depósitos de esmeraldas atribuidos a metamorfismo regional parece que se originaron en eventos postectónicos, por cambios químicos (metasomatismo) entre rocas félsicas, tales como neises cuarzo-feldespáticos, esquistos granatíferos o pegmatitas premetamórficas, relacionadas con rocas adyacentes portadoras de Cr, como serpentinitas. La relación entre las rocas que proveen el Cr y Be puede ser tectónica. Este tipo de yacimientos se encuentra por lo general en zonas de escudo, las cuales han sufrido casi siempre varios eventos orogénicos que han cambiado parcial o totalmente las rocas originarias.

Entre los depósitos de esmeraldas relacionados con metamorfismo regional en escudos antiguos se puede citar el de Sandawana (Zimbabue), donde las esmeraldas se formaron a lo largo del cinturón verde de Mweza, en el cratón arqueano de Zimbabue, entre pegmatitas deformadas y rocas vulcanosedimentarias.

Un depósito de esmeraldas atribuido a metamorfismo de contacto se encuentra en Ucrania, donde la mineralización se presenta en la zona de alteración entre pegmatitas y rocas ultrabásicas. (Giuliani., et al, 1992).

2.3.3. Depósitos relacionados con procesos hidrotermales

Los depósitos hidrotermales de esmeraldas se pueden dividir en dos tipos: hidrotermales con influencia magmática e hidrotermales sin influencia magmática.

2.3.3.1. Depósitos hidrotermales con influencia magmática

Se presentan en las últimas etapas de cristalización magmática, cuando soluciones hidrotermales salen del magma como líquidos alcalinos ricos en constituyentes volátiles (fase neumatolítica), y se depositan en zonas de cizalla, fisuras y cavidades. Por lo regular presentan remplazamiento y alteraciones en las rocas encajantes, y se han clasificado, según su profundidad, en hipotermales, mesotermales y epitermales (Garcés, 1995).

Este tipo de yacimiento se caracteriza por la interacción de soluciones con rocas volcánicas, en la que el Be es derivado de micas y feldespatos de granitos y el Cr de rocas máficas encajantes (Schwarz, 2002).

Esta clase de depósito se presenta en Guantú (Nigeria), donde por la alteración de la parte basal de pegmatitas las esmeraldas se formaron por albitización, mediante metasomatismo alcalino, a temperaturas de 400 a 450 °C.

2.3.3.2. Depósitos hidrotermales sin influencia magmática

En el modelo tectónico-hidrotermal la formación de esmeraldas ocurre como resultado de la actividad hidrotermal asociada a fallas corticales o zonas de cizalla que afectan a esquistos máficos-ultramáficos. Las estructuras concentran el flujo de los fluidos, que lixivian Cr-V en las rocas básicas y precipitan las esmeraldas en el frente de alteración metasomatismo durante la interacción roca-fluido, cuando el fluido portador del Be encuentra el esquisto rico en Cr. En este tipo de yacimiento la salinidad del fluido puede oscilar desde bastante baja hasta supersaturada (Recio y Subias, 2007).

La presencia de sulfatos parece ser importante a la hora de controlar la química del fluido durante la precipitación de esmeraldas. Este modelo no requiere la existencia de pegmatitas o rocas ígneas (graníticas) asociadas.

Los yacimientos colombianos son un caso especial dentro de este modelo; en Colombia el origen de los yacimientos de esmeraldas en los dos cinturones parece responder a procesos de tipo hidrotermal sin influencia magmática, relacionados con salmueras provenientes de evaporitas que se encontraban en la cuenca sedimentaria, e interactuaron con rocas lutíticas negras carbonosas que liberaron Cr, V y Be, a temperaturas entre 300 y 350 °C y 900 y 1000 bares de presión.

2.3.4. Depósitos de esmeraldas a nivel mundial

Los depósitos de esmeraldas están ampliamente distribuidos en el mundo, tanto en el tiempo como en el campo geográfico. Las mineralizaciones de esmeraldas se encuentran desde el Precámbrico hasta el Neógeno; de más antigua a más joven, se pueden citar las siguientes:

- 2997 Ma, depósitos de Transvaal en el arqueano de Sudáfrica.
- 2600 Ma, depósitos de Poona (Australia) y Sandawana (Zimbabue).
- 2000 Ma, esmeraldas de Brasil en Carnaíba y Socota en el estado de Bahía, durante el Proterozoico temprano.
- 500 Ma, en Brasil, en los depósitos de Minas Gerais (minas Belmont, Capeirana, Piteiras).
- 510 a 520 Ma, respectivamente. Depósito de Santa Teresinha en Goias, formados durante el Proterozoico.
- 490 Ma, en África se encuentran depósitos en Manan-jari y Ianapera.
- 109 Ma, en Canadá en los montes Regal, del Cretáceo medio.
- 65 a 37 Ma, los yacimientos de esmeraldas de Colombia se encuentran localizados en dos cinturones: el Occidental (Muzo), que tiene 37 Ma, y el Oriental (Chivor), que posee 65 Ma.
- 40 a 25 Ma, en Habachtal (Australia).
- 34 Ma, al oeste del macizo de Rhodopa, al suroeste de Bulgaria.
- 23 Ma en el valle de Swat (Pakistán).
- 9 Ma, depósitos esmeraldíferos más jóvenes del mundo y se encuentran en Khaltaro región sur de Gilgit (Pakistán) (Schwarz, 2002).

Geográficamente, las esmeraldas se encuentran distribuidas en los cinco continentes y en veintinueve países (tabla 2 y figura 6).

En el continente americano las esmeraldas se encuentran en Canadá, Estados Unidos, Colombia y Brasil. Los depósitos de América más representativos por su calidad y belleza son los de Colombia, y por su volumen, número de minas y prospectos, los de Brasil.

En Asia se han localizado en Pakistán, Afganistán, India y China. Los de Afganistán, en el valle de Panjshir, son los más conocidos y comercializados de Asia, ya que sus esmeraldas tienen una belleza similar a la de las colombianas.

Por su parte, África es el continente que tiene mayor número de países con mineralizaciones de esmeraldas. Se han encontrado en Egipto, Nigeria, Tanzania, Mozambique, Zambia, Madagascar y Sudáfrica. Los depósitos de Zimbabue son los más importantes de este continente gracias a su calidad.

Tabla 2. Países con ocurrencias de esmeraldas y su origen

Continente	País	Actividad magmática		Metamorfismo		Hidrotermal sin influencia magmática
		Pegmatitas	Hidrotermal	Regional	Contacto	
Asia	Pakistán	X	X			
	Afganistán	X		X		
	India	X				
	China					
Australia	Poona East			X		
	Poona Mine	X				
	Warda Warra	X				
	Melville	X				
África	Egipto		X			
	Madagascar		X			
	Mozambique				X	
	Namibia			X		
	Nigeria		X			
	Sudáfrica		X			
	Tanzania			X		
	Zambia		X			
	Zimbabue			X		
	Somalia	X				
Europa	Bulgaria	X				
	Italia	X				
	Noruega	X				
	Austria			X		
	España	X				
	Rusia	X				
	Ucrania				X	
América	Canadá		X			
	Estados Unidos	X				
	Colombia					X
	Brasil	X*	X	X		
		X**				

* Por diques de granito

** Zona de contacto entre granito y metamórfica

Fuente: Giuliani et al. (1992)

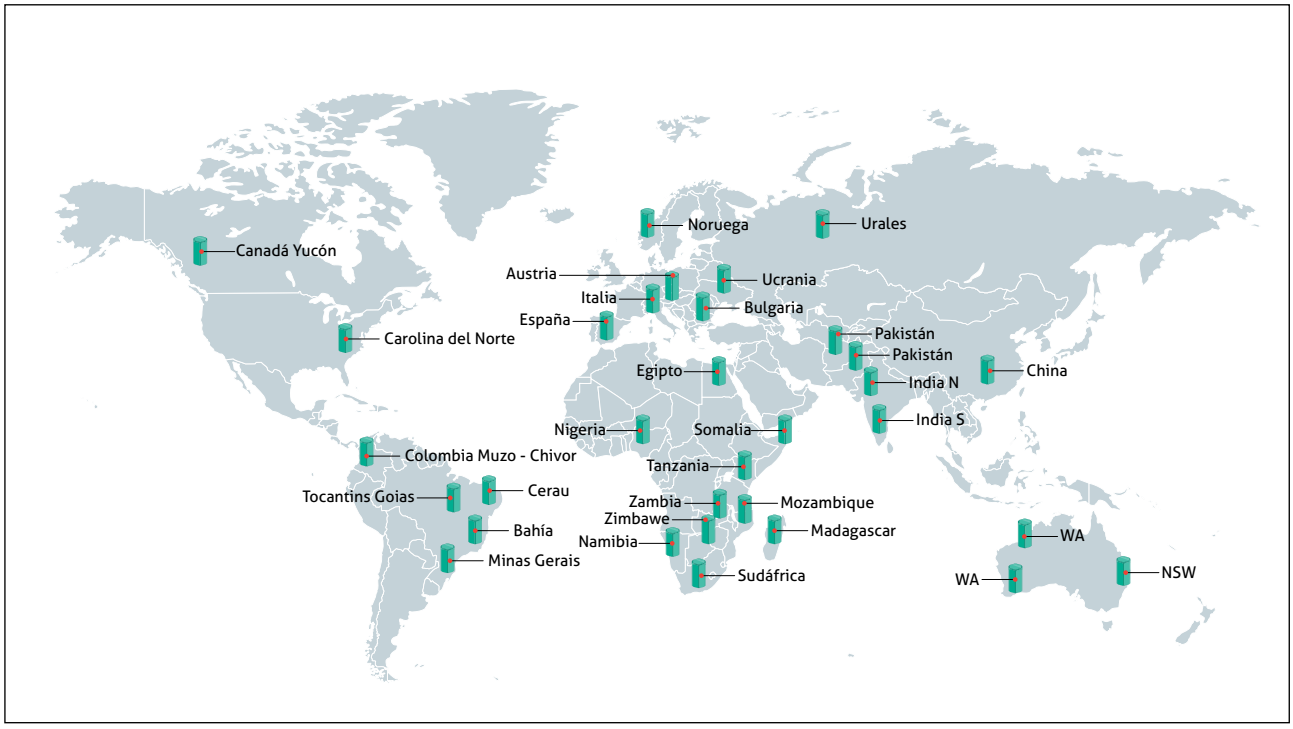


Figura 6. Países con mineralizaciones de esmeraldas

Fuente: Giuliani *et al.* (1992)

En Europa las esmeraldas se encuentran localizadas en Italia, Austria, Noruega, España, Rusia y Ucrania; las minas que han producido mayor cantidad de esmeraldas han sido las de Malisheva, en Rusia.

Las minas de mayor relevancia mundial son las de Colombia, por ser las más finas y bellas; las principales se encuentran localizadas en la cordillera Oriental, en dos cinturones: el Oriental (Chivor) y el Occidental (Muzo).

En el continente australiano se han reportado cuatro localidades con esmeraldas: Poona East, Poona Mine, Warda Warra y Melville (Giuliani *et al.*, 1992).

2.3.4.1. Minas de Brasil

En el estado de Minas Gerais se encuentran las minas de Belmot. La mina Belmot, descubierta en 1978 en la región de Itabirita-Nova Era, está localizada a 13 km de Itabirita y a 120 km de Belo Horizonte.

Las esmeraldas se encuentran en una serie proterozoica, de esquistos y neises replegados, cortados por pequeños cuerpos de pegmatita. Las esmeraldas se formaron durante el metamorfismo regional en fases esquisto verde y anfibolita, en esquistos flogopíticos acompañadas de crisoberilo y alexandrita (Sousa *et al.*, 1992, citados en Schwarz, 2002).

2.3.4.2. Minas en Afganistán

En Asia, en el valle de Panjshir (Afganistán), en las estribaciones del sistema montañoso de Hindu Kush, 130 km al norte de Kabul, se encuentra el distrito minero redescubierto por geólogos rusos en 1970, aun cuando parece que las minas se trabajaron anteriormente y las esmeraldas se transportaron a joyerías hindúes.

Las minas se hallan en un área de 400 km^2 al este de las riberas del río Panshir. Los sectores más importantes son Khejen, Buznal (Oashte-Rewat) y Nikon. En la región de las minas se encuentran decenas de socavones y túneles dispersos a través del terreno montañoso. Las minas están ubicadas a lo largo de la falla de Panjshir, en zonas de cizalla que cortan metasedimentos del Paleozoico, compuestos principalmente por esquistos moscovíticos y una serie de diorita-gabro, intruidos por pórfidos cuarzosos. Las esmeraldas se encuentran en venas de cuarzo, y se observa albitización y piritización hidrotermal en los alrededores de las mineralizaciones.

En inclusiones fluidas de las esmeraldas se ha encontrado halita, que indica alta salinidad y evaporación de los fluidos originarios. La fuente de Be es desconocida y el V y Cr pueden provenir de metasedimentos.

2.3.4.3. Minas en Rusia

En Rusia, en los montes Urales, se localiza un yacimiento esmeraldífero con un área aproximada de 100 km^2 en el sector de Malicheva Takovaya (minas Izumrudnye Kopi), cerca de la corriente Takovaya, a unos 60 km al noreste de Ekaterimburgo, en los Urales medios.

Estas minas fueron descubiertas en la corriente de Takovaya en 1830; su producción a finales del siglo XIX y principios del siglo XX fue una de las mayores del mundo, y en 1940-1950 comenzó la producción de Be a gran escala, parte de la cual se empleó en reactores nucleares y como subproducto se extrajeron esmeraldas. Estas minas se explotan a tajo abierto y mediante trabajos subterráneos, hasta 250 m de profundidad.

La génesis del depósito Izumrudnye Kopi, en Rusia, no está claramente establecida; existen tres modelos:

- Descilificación de pegmatitas graníticas en contacto con intrusiones básicas. Las esmeraldas se encuentran en zonas de las paredes oscuras.
- Beus (1966) considera mineralizaciones por topacio alterado, en rocas básicas y ultrabásicas.
- Giuliani., et al, 1992, indica que la mineralización se presenta por metamorfismo regional, alteración de topacio, pegmatitas y aplitas con pegmatitas penakíticas, berilo y alexandrita.

2.4. Métodos de prospección

Como en otros minerales, los estudios deben realizarse en las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada.

En la etapa de *reconocimiento* se identifican las áreas con potencial de mineralización, a partir de los resultados de los estudios geológicos regionales, que incluyen comprobación de la fotointerpretación, ejecutando cartografía aérea de anomalías de color y la inspección preliminar de campo. También se ejecutan otros trabajos regionales, por ejemplo estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La *prospección* se realiza con el propósito de identificar el depósito posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques), y perforaciones aisladas para medir el comportamiento de la mineralización en la profundidad. Se ejecutan trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos, electromagnéticos y geoeléctricos preferentemente. Se deberán obtener, con carácter preliminar, las dimensiones y la morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calcularán recursos inferidos que deben utilizarse en un estudio conceptual, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

Para el caso de las esmeraldas existen dos métodos de prospección utilizados: el geoquímico y el geofísico.

2.4.1. Prospección geoquímica

Este método establece con claridad la distribución y relación de ciertos elementos químicos que pueden utilizarse como indicadores geoquímicos; en las muestras que se toman se analizan por absorción atómica para los elementos Na, Li, K, Sr, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Mo y Be. Luego se analiza la fracción menor de malla 80. Para el muestreo se siguió un sistema de enrejado, cubriendo en la primera fase una distancia aproximada de 300 m a cada lado de los sitios de interés (Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).

2.4.2. Prospección geofísica

Los métodos geofísicos utilizados en la exploración de esmeraldas son muy variados, dependiendo de la variable geofísica a medir y de las características geológicas del sitio mineralizado a explorar.

En la exploración de esmeraldas en Colombia se emplearon varios métodos geofísicos como guías indirectas en algunas zonas esmeraldíferas, con el fin de escoger el más útil en la búsqueda de zonas estructurales que se suponen están controlando la mineralización esmeraldífera. Se adelantó magnetometría, espectrometría de rayos gamma y electromagnetismo de muy baja frecuencia, encontrándose este último como el más exitoso.

2.5. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

Para diseñar los sistemas más adecuados de explotación de las esmeraldas, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Relieve: plano, en ladera a favor o en contra del talud o diferentes accidentes topográficos.
- Posición del yacimiento: superficial cuando el material estéril está a una distancia inferior de 20 a 30 m de profundidad; profunda cuando la zona mineralizada se localiza a profundidades mayores de 40 m, o variable cuando una parte se puede explotar a cielo abierto y el resto por minería subterránea.

- Por inclinación: horizontales, tumbados, inclinados o verticales.
- Complejidad del número de mineralizaciones: simple o compleja que tiene zonas enriquecidas y partes estériles.
- Calidad del mineral: no uniforme. Por lo regular, las mineralizaciones son muy distintas e irregulares.
- Tipo de rocas dominantes: es muy variable; en unas rocas son muy compactas, ígnea, metamórfica, y en otras son menos compactas, como en las sedimentarias.

En general, existen dos métodos de explotación: de superficie o cielo abierto, y de interior o subterráneos. En la extracción de esmeraldas se están empleando los dos métodos, considerando que las mineralizaciones son muy irregulares, pero el método más empleado es el subterráneo, mediante túneles dirigidos siguiendo la mineralización, utilizando el método de cámaras y pilares; el de cielo abierto remueve la gran cantidad de material estéril.

2.6. Recursos, reservas y comercio

Actualmente no se conocen evaluaciones de los recursos mundiales de gemas y mucho menos de esmeraldas, debido a que las gemas en general no forman yacimientos, como ocurre con otros minerales; por tanto, las cifras de reservas calculadas no son confiables, ya que los productores no dan a conocer datos fidedignos.

Tampoco se conocen estadísticas confiables del mercado mundial de las esmeraldas; sin embargo, se estima que hoy en día las ventas anuales alcanzan aproximadamente los mil millones de dólares (Simandl, Paradis y Birkett, 1999).

Varias fuentes coinciden en que Colombia se ha mantenido por muchos años como el país líder en calidad, con una participación de cerca del 80 % en las ventas de esmeraldas de más alta calidad y en cantidad con una participación cercana al 50 % en el total de ventas (UPME, 2006, 2009), seguida de Brasil y Zambia, participando esta última en un 20 % (Yager, Menzie y Olson, 2008).

El precio de la esmeralda está determinado por su demanda, belleza, color, carencia de defectos e inclusiones, y perfección del tallado. En la comercialización internacional se denomina primario para las gemas en bruto y secundario para las gemas talladas o engastadas.

Los principales países que se han establecido como mercado de las esmeraldas son Hong Kong, Sudáfrica, Suecia, Reino Unido, Bélgica, Tailandia, Emiratos Árabes Unidos e Italia (Yager, Menzie y Olson, 2008).

El valor de las esmeraldas en el mercado mundial se deriva de la escasez de su ocurrencia, su belleza y la talla de las piedras. Esto significa que una vez que se lleva a cabo la mineralización se enfrenta un gran problema: la capacidad limitada de proveer demanda de piedras de buena calidad. El mercado para las esmeraldas ha sido importante y continuará siéndolo en el futuro próximo.

2.7. Perspectivas

En la actualidad la demanda mundial de esmeraldas colombianas es tan alta que casi toda la producción se exporta, a pesar de que el mercado de las esmeraldas se comporta diferente en función de sus presentaciones.

Pese a que las esmeraldas talladas son las de mayor demanda, las esmeraldas colombianas se exportan en su gran mayoría en bruto, para su posterior transformación en gemas talladas, las cuales se reexportan a los principales países importadores (Minercol, 2000).

Las proyecciones del mercado muestran una tendencia a la baja de los precios. La ventaja de Colombia es que posee una de las variedades de esmeraldas de más alta calidad y es uno de los mayores exportadores del mundo, lo que le otorga una excelente posición en el mercado internacional; no obstante, el hecho de no contar con una industria fuerte en la talla y engaste hace que las mayores ganancias queden fuera del país, en manos de multinacionales especializadas en estos procesos (UPME, 2000).

3. Esmeralda en Colombia

Los Andes suramericanos están representados en Colombia por tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental. Las mineralizaciones de esmeraldas están ubicadas en la cordillera Oriental y las minas están distribuidas en dos cinturones (figura 7): el Cinturón Esmeraldífero Occidental (municipios de Muzo, Otanche, San Pablo de Borbur, Maripí, Yacopí y La Palma), y el Cinturón Esmeraldífero Oriental (municipios de Gachalá, Ubalá, Macanal y Chivor).

La cartografía geológica del Cinturón Esmeraldífero Occidental la realizaron Ulloa y Rodríguez (1978, 1991), planchas 170 Vélez, 190 Chiquinquirá, y Rodríguez y Ulloa (1994a, 1994b), 169 Puerto Romero y 189 La Palma; la del Cinturón Esmeraldífero Oriental se encuentra en el cuadrángulo K-12 Guateque y la hicieron Ulloa, Camacho y Escovar (1975). En las respectivas memorias geológicas de dichas planchas se encuentra una descripción sucinta tanto de las estructuras geológicas como de sucesión litoestratigráfica.

Ingeominas lleva a cabo, desde el 2005, un programa para exploración de esmeraldas, uno de cuyos objetivos es

actualizar la cartografía geológica de los dos cinturones esmeraldíferos; es así como en el Cinturón Esmeraldífero Occidental se diferencian unidades litológicas con edades del Berriasiano hasta el Neógeno, en tanto que en el Cinturón Oriental las rocas involucradas van desde el Paleozoico hasta el Albiano.

3.1. Geología regional

El zócalo de la corteza terrestre colombiana está conformado, al oriente, por rocas metamórficas precámbricas de composición siálica; la falla Cauca-Almaguer la separa del zócalo occidental, constituido por rocas ígneas de composición simática y rocas sedimentarias de edad cretácico superior (Gomez *et al*., 2006).

En el basamento oriental se han reconocido tres provincias, una de las cuales, la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana, está compuesta por esquistos, neises, anfibolitas y granulitas afectadas por varios eventos orogénicos (Gomez *et al*., 2006). Sobre esta se desarrolló la sedimentación cretácica de la cordillera Oriental, donde se localizan los dos cinturones esmeraldíferos.

La sedimentación cretácica está caracterizada por la existencia de cuencas extensionales, lentamente invadidas por el mar durante el Berriasiano, el cual avanzó desde el occidente, entró por la cordillera Central (Etayo Serna, Renzoni y Barrero, 1976) e invadió la llamada Cuenca de Cundinamarca (Sarmiento, 2002). La zona depocentral de esta cuenca se desarrolló en lo que hoy corresponde a la parte central de la cordillera Oriental y, a partir de allí, el mar avanzó tanto hacia el noreste como hacia el suroeste (Etayo Serna, Renzoni y Barrero, 1976). Estas cuencas se reactivaron mediante inversión tectónica, durante la orogenia andina en el Mioceno-Plioceno (Colletta *et al*., 1990; Branquet *et al*., 2002).

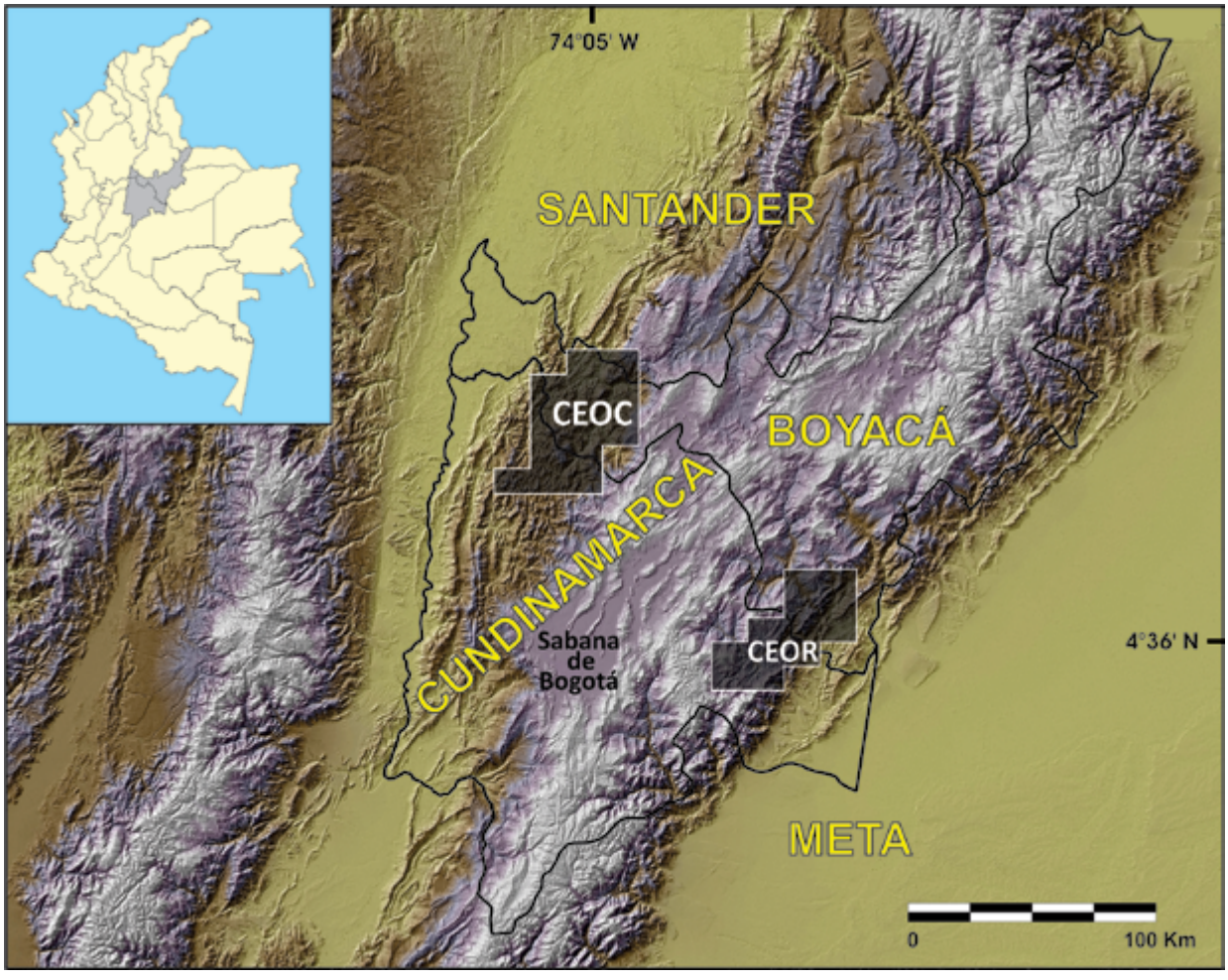


Figura 7. Mapa de localización del Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO) y el Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR), cordillera Oriental, Colombia

Fuente: Terraza, R. y Montoya, D. (2011)

La cordillera Oriental se formó como respuesta a esfuerzos compresivos que involucran la convergencia de las placas de Suramérica, Nazca y Caribe. Esta interacción dio lugar a una deformación intensa y un acortamiento en dirección ENE-WSW, perpendicular a las estructuras regionales. Sarmiento (2002) plantea que hubo deformación por movimientos transcurrentes dextrales en la Cuenca de Cundinamarca, en la cual se localizan los cinturones esmeraldíferos.

3.2. Geología local

En Colombia se encuentran dos provincias o cinturones esmeraldíferos:

3.2.1. Cinturón Esmeraldífero Occidental

Este cinturón se localiza hacia el flanco occidental de la cordillera Oriental (figura 7); su municipio más al sur se localiza en el departamento de Cundinamarca (La Palma) y el municipio más norte se ubica en el departamento de Santander (La Belleza).

En los estudios anteriores adelantados por Ingeominas (Ulloa y Rodríguez, 1978; Ulloa, Camacho y Escovar, 1975; Rodríguez y Ulloa, 1994a, 1994b) se localiza el distrito minero de Peñas Blancas en la Formación Rosablanca, asignada al Valanginiano, y las minas del sector de Muzo y Coscuez, en rocas de la Formación Paja, asignada al intervalo Valanginiano-Aptiano, lapso bastante amplio y en el cual se depositó una gruesa secuencia sedimentaria. En este contexto, la posición de las mineralizaciones no era clara.

A partir de los recientes estudios geológicos realizados por Ingeominas, cuyos resultados están consignados en el informe de Reyes *et al*. (2006), estas mineralizaciones se ubican así: las del sector de Peñas Blancas en la Formación Rosablanca (piso Valanginiano inferior), y las minas de los sectores de Muzo, Coscuez, La Pita y Yacopí, en la parte baja de una unidad calcáreo-siliciclástica de edad Barremiano-Hauteriviano (figura 8).

3.2.1.1. Estratigrafía

A continuación se hace una descripción de las unidades involucradas, las cuales se describirán de base a techo como Formación Rosablanca (piso Valangiano Inferior), piso Valangiano superior y piso Hauteriviano-Barremiano (figura 8).

Formación Rosablanca (piso Valanginiano inferior b2$_i$). Esta unidad se reconoce en la parte noreste del Cinturón Occidental (municipios de La Belleza, Florián y San Pablo de Borbur), y conforma el núcleo del Anticlinal Alto de La Chapa-Borbur (Reyes *et al*., 2006).

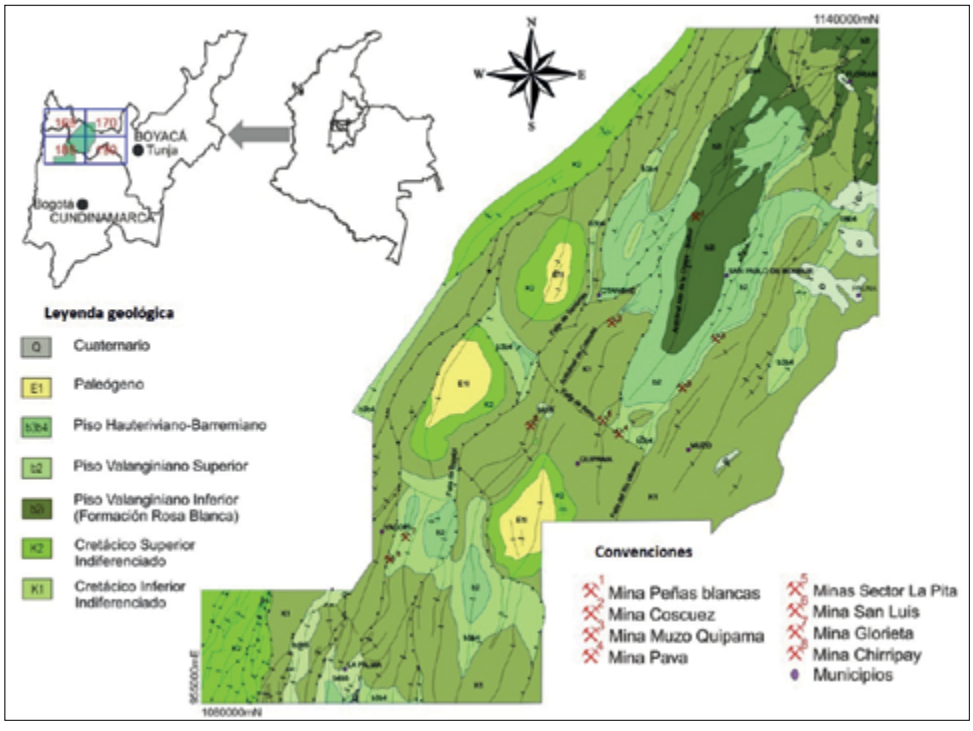


Figura 8. Geología del Cinturón Esmeraldífero Occidental

Fuente: Reyes *et al.* (2006)

En la parte norte, sus límites inferior y superior están marcados con arenitas de la Formación Cumbre y con rocas limo-arenosas de la Formación Ritoque (municipios de La Belleza, Florián), mientras que en el área de San Pablo de Borbur su límite superior es con una unidad arcillosa-lodolítica de edad Valanginiano (en proceso de formalización) y su límite inferior no aflora. Se le asigna edad Valanginiano, posiblemente Valanginiano temprano (Reyes *et al*., 2006).

Litología. La Formación Rosablanca está compuesta por micritas y micritas arcillosas negras, en capas que van desde delgadas hasta gruesas, tabulares, con laminación interna plana paralela poco desarrollada (capas de aspecto macizo); se intercalan estratos de lodolitas calcáreas carbonosas y de arcillolitas negras; algunos niveles muestran nódulos micríticos de hasta 0.4 m de diámetro, con pirita y calcopirita (Reyes *et al*., 2006).

En el distrito minero de Peñas Blancas afloran capas gruesas de micritas, intercaladas con capas de intramicroruditas, lodolitas calcáreas y cuarzoarenitas con cemento calcáreo; en la parte más inferior se observan capas delgadas y medianas de micritas con capas de lodolitas calcáreas carbonosas intercaladas; es en este sector donde se presentan las mineralizaciones de esmeralda (Reyes *et al*., 2006).

Piso Valanginiano Superior (b2). Esta unidad se encuentra sobre los flancos del anticlinal La Chapa-Borbur y en el sinclinal de Santa Bárbara-río Pescadero. Al sur, forma parte del núcleo del anticlinal de Yacopí y del anticlinal de Ibama. Está representada por arcillolitas, lodolitas y limolitas, intercaladas principalmente en secuencias rítmicas de diferentes escalas, desde milimétrica hasta métrica; con un espesor de 1083 m, se encuentra suprayaciendo a micritas de la Formación Rosablanca e infrayaciendo a la unidad calcáreo-siliciclástica denominada en este trabajo piso Hauteriviano-Barremiano. Se le asigna edad Valanginiano (Etayo Serna, comunicación verbal, citado en Reyes *et al*., 2006).

Litología. En esta unidad se diferencian cuatro segmentos. El segmento inferior es de arcillolitas y arcillolitas carbonosas grises en capas muy gruesas, con laminación fina a media, plana paralela y continua dada por la acumulación de materia orgánica; se presentan yeso, pirita diseminada y óxidos de hierro.

El segundo segmento forma escarpe topográfico y está compuesto de lodolitas y limolitas, en ocasiones silíceas, de colores grises, en capas medianas a gruesas, plano paralelas y continuas, separados por arcillolitas carbonosas en capas delgadas. Se observan lentes de carbón, moscovita, pirita, yeso (en lentes y láminas paralelos a la estratificación) y sulfatos.

El tercer segmento es una sucesión lodolítica-arcillosa; la parte baja está constituida por lodolitas calcáreas y no calcáreas de color gris, que se disponen en capas tabulares a lenticulares, medianas y gruesas. Le siguen lodolitas dispuestas en capas gruesas, medianas y delgadas, con estratificación continua plano paralela. En todo el segmento hay pirita y yeso diseminado en láminas o venillas, además de nódulos silíceos y sulfuros; en general, las rocas son fisiles y tienen foliación tectónica.

En el cuarto segmento la parte inferior son lodolitas y arcillolitas con intercalaciones con arenitas y limolitas en capas lenticulares y tabulares, medianas a gruesas; algunas presentan composición calcárea.

Piso Hauteriviano-Barremiano (b3b4). Esta unidad aflora de oriente a occidente en el anticlinal de Pauna, sinclinal El Almendro, anticlinal de La Chapa-Borbur, sinclinal del río Pescadero y anticlinal de Coscuez (Reyes *et al*., 2006).

Está representado por rocas de composición calcárea y siliciclástica; su límite inferior es neto, con rocas arcillosas no calcáreas del piso Valanginiano superior; el límite superior se identifica cuando la naturaleza de la roca se hace de grano más fino (arcillolitas) y de carácter terrígeno. La edad asignada es Hauteriviano-Barremiano, principalmente (Reyes *et al*., 2006).

Litología. En este piso se intercalan capas tabulares delgadas a medianas de lodolitas calcáreas carbonosas y caliza micrítica gris, en ocasiones de aspecto lenticular; también se intercalan capas delgadas de arenitas de grano muy fino, a veces con cemento calcáreo. Es común la albitización de la roca, por lo cual adquieren coloración gris claro, café amarillento pálido y gris oliva pálido; además, se aprecian venas de calcita-albita, pirita y brechas hidrotermales. En general, se aprecian nódulos de pirita, y venas de calcita paralelas o que cortan la estratificación (Reyes *et al*., 2006).

3.2.1.2. Geología estructural

El plegamiento es notorio a escala regional y local; regionalmente, se presentan pliegues sinclinales amplios, poco deformados con cierres estructurales. Los anticlinales que los separan no están bien definidos, presentan cierres muy rápidos y apretados y, por lo general, asimétricos; como excepción se tiene el anticlinal de La Chapa-Borbur, el único amplio y regional (figura 8) (Reyes *et al*., 2006).

Las fallas son inversas con movimiento transcurrente; cartográficamente, muestran segmentos rectos cuando son transcurrentes y sinuosos cuando el predominio es inverso. Los pliegues en general son oblicuos a las fallas, lo que refuerza su carácter transcurrente (Reyes *et al*., 2006).

En general, las fallas principales no se observan mineralizadas y varias brechas que normalmente se reconocen en las minas de esmeraldas son de origen hidrotermal (se pueden confundir con las brechas tectónicas cuando una falla afecta una zona mineralizada). Las observaciones de campo sugieren que las fallas importantes son posteriores a la mineralización de esmeraldas (Reyes *et al*., 2006), pero tanto planos de debilidad como la estratificación, diaclasas y fallas menores (con desplazamientos métricos a milimétricos) fueron los conductos por los cuales circularon los fluidos mineralizantes.

Anticlinal Alto de La Chapa-Borbur. Tiene una dirección entre norte-sur a N45 °E. En su núcleo aflora la Formación Rosablanca y en los flancos el piso Valanginiano superior; está limitado por la falla del río Minero al oriente y por la falla de Peñas Blancas al occidente, mientras que al sur termina en la falla de Itoco. Tiene una longitud de más de 40 km. Es una estructura asimétrica, con el flanco occidental más inclinado, que llega a la inversión cerca de la falla de Peñas Blancas (Reyes *et al*., 2006).

Anticlinal de Coscuez. Se extiende desde la falla Itoco hasta el sur de la localidad de San Martín. Tiene una amplitud aproximada de 3 km y una longitud de unos 12 km. En el sector de Coscuez el núcleo presenta rocas del piso Hauteriviano-Barremiano. Es una estructura relativamente simétrica y poco deformada en su interior, excepto en la zona mineralizada de Coscuez, donde las rocas del piso Hauteriviano-Barremiano presentan una estratificación fina e intercalaciones de lodolitas y lodolitas calcáreas, propicias para la generación de plegamientos muy apretados y frecuentes, que denotan un acortamiento y una deformación muy fuertes (Reyes *et al*., 2006).

Falla del río Minero. Su nombre se deriva del río Minero, por el cual va la falla subparalelamente; su trazo, con dirección N20 °E-N35 °E, es rectilíneo, pero con algunas variaciones pequeñas en su rumbo. En la parte sur del área tiene dirección N20 °E, con comportamiento predominante transcurrente dextral, y pone en contacto diferentes conjuntos estratigráficos (Reyes *et al*., 2006).

Falla Tambrías. Se designa con este nombre a la falla que va por la quebrada del mismo nombre y que se extiende desde el Sistema de Fallas de La Salina (norte) hasta la localidad de Cormal (sur), donde su movimiento se transfiere a las fallas de Itoco, La Victoria y Topaipí. Se trata de una falla de cabalgamiento con vergencia al occidente, con el salto más grande al nororiente de Otanche, donde coloca rocas del piso Hauteriviano-Barremiano sobre rocas del Albiano medio (Reyes *et al*., 2006).

Falla de Topaipí. Se designa con este nombre a una falla de cabalgamiento reconocida entre la localidad de Cormal y la localidad de Topaipí, al sur del área; tiene una dirección norte-sur a noreste-suroeste. Al norte se inicia como una transferencia de la falla Tambrías; es de cabalgamiento, con vergencia al oriente; pone rocas del Valanginiano hasta Aptiano, sobre rocas del Albiano superior (Reyes *et al*., 2006).

Falla de Itoco. Falla transversal (N50 °W) que va a lo largo de la quebrada Itoco, bordeando las zonas mineras de Muzo y Las Pavas. Esta falla en el contexto regional tiene un movimiento sinestral, con levantamiento del bloque norte sobre el del sur, hasta el punto de que pone rocas barremianas sobre aptianas (Reyes *et al*., 2006).

3.2.1.3. Mineralización y minas del Cinturón Occidental

En este cinturón se localizan varios distritos mineros, entre los que sobresalen los de Coscuez (figura 9A); Muzo-Quípama (figura 9B), y Las Pavas y La Pita (figura 9C). Las minas del sector de Muzo y Quípama están separadas por la quebrada Itoco; los cortes más conocidos del sector de Muzo son Puerto Arturo, Tequendama y Repollal, en tanto que los del sector de La Pita son La Pita, Cunas, Totumos, Consorcio, Polveros y La Marina. En el sector de Coscuez se observan varios cortes y en el corregimiento de Santa Bárbara se tiene la mina de Calcetero (figura 8).

De las observaciones realizadas y los estudios detallados, se puede concluir lo siguiente:

- Todas estas minas productivas se encuentran en el piso Hauteriviano-Barremiano, lo que indica que la mineralización de esmeraldas en este cinturón se controló estratigráficamente (figura 9C) y no por sistemas de fallas, debido a que las minas no se localizan sobre estas estructuras ni cerca de ellas (Reyes *et al*., 2006).
- El detallado estudio estructural realizado por Ingeominas y Mora (2005), en la zona de Coscuez y en la carretera Pauna-San Pablo de Borbur a la altura de la mina La

Marina, en el que se midió la actitud estructural de ejes de pliegues, fracturas, foliación tectónica, vetas y venas, mostró una coherencia estructural consistente con el hecho de que todas estas estructuras se originaron en un mismo evento deformativo, posiblemente en fases distintas pero próximas, y que las mineralizaciones estaban englobadas en un proceso de plegamiento y se aprovecharon los planos de estratificación.

- En ningún caso se pudo observar una relación directa de la mineralización con las fallas; cabe aclarar que los brechamientos que se observan en las zonas mineralizadas son de tipo hidráulico y no tectónico (Reyes *et al*., 2006). No obstante, como ya se indicó, tanto fallas menores (con desplazamientos métricos a milimétricos, junto con otros planos de debilidad) como la estratificación y diaclasas fueron los conductos por los cuales circularon los fluidos mineralizantes.
- Es notable la presencia de un metasomatismo alcalino (albita), producido por el fluido mineralizante en las rocas. Este fluido es percolante y en ocasiones destruye el aspecto de la roca original y le imprime un carácter blando; produce también brechas hidrotermales, vetas o venas paralelas, o que cortan la estratificación (figura 10).
- Varios autores han estudiado la paragénesis y formas de presentación de la mineralización, entre los que se destacan Restrepo (1961), Hall (1976) y Ottaway (1991). Hall (1976) analiza la descripción dada por Scheibe (1933), quien describía de abajo hacia arriba estratigráficamente los siguientes intervalos: el más inferior, "cambiado"; sigue "la roca albitizada", luego "la cama, el cenicero y las capas buenas"; sin embargo, de acuerdo con lo observado en campo por Ingeominas (Reyes *et al*., 2006) y el análisis de Hall (1976), esto no se debe tomar como una sucesión estratigráfica, ya que la roca albitizada, la cama y el cenicero corresponden a estructuras formadas por los fluidos mineralizantes de las esmeraldas. Tanto el "cenicero" como la "cama" representan brechas hidráulicas, así como lo que los mineros llaman "la zona".



Figura 9. Panorámica de las zonas mineralizadas en el sector de Muzo-Coscuez, correspondiente al piso Hauteriviano-Barremiano (b3b4)

Fuente: Reyes ***et al.*** (2006)

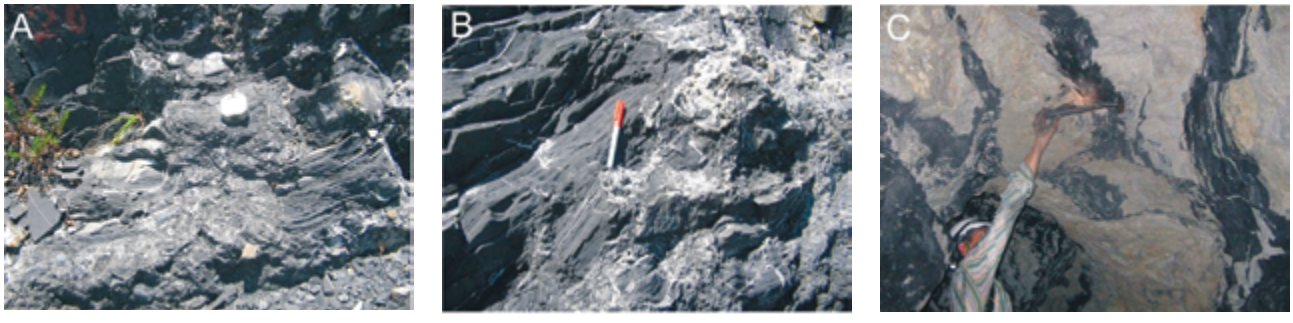


Figura 10. Presentación de las zonas de mineralización de esmeraldas en los distritos de Coscuez y Muzo.
A. Brechas hidrotermales en el sector de Coscuez;
B. vetas, venas y brechas hidrotermales, Coscuez;
C. zonas albitizadas de la mina Puerto Arturo (Muzo)

Fuente: Reyes et al. (2006)

Ottaway (1991) define para la mineralización de esmeralda del sector de Muzo las siguientes características mineralógicas, las cuales se observaron en la mayoría de los cortes:

- Paragénesis: albita, calcita-dolomita-ankerita y pirita.
- Parisita: puede ser un buen indicador mineral, para encontrar esmeraldas.
- Minerales accesorios: fluorita y barita.
- Otros minerales: moscovita, cuarzo, micas.

A renglón seguido se describirán algunas características de las mineralizaciones de este cinturón.

3.2.1.4. Mineralización del distrito de Peñas Blancas

Está localizado al norte de San Pablo de Borbur y al occidente de Otanche. Litológicamente se ubica en las calizas de la Formación Rosablanca. La mineralización se presenta en vetas de calcita perpendiculares a la estratificación y se concentran sobre todo en el núcleo del anticlinal de Alto de La Chapa-Borbur. La minería es subterránea y mineralógicamente la asociación más constante es de calcita-dolomita-albita (Reyes *et al*., 2006).

3.2.1.5. Mineralización del distrito de Coscuez

La zona mineralizada de Coscuez está localizada al sur del corregimiento de Santa Bárbara. La mineralización está concentrada en un cerro alargado, compuesto por rocas calcáreas de edad Hauteriviano-Barremiano de estratificación delgada, muy plegadas, las cuales forman un anticlinal con cabeceo hacia el suroccidente.

La minería es subterránea, en tanto que las bocaminas rodean el cerro y apuntan hacia su núcleo; la mineralización se presenta en tres formas: venas y vetas paralelas o perpendiculares a la estratificación; brechamiento hidráulico y en "zonas", estas últimas totalmente albitizadas (figura 10). Se observan bandas blanquecinas con bandas oscuras o fragmentos de roca blanquecina, rodeados de material frágil negro o viceversa. La mineralogía dominante es calcita-dolomita-albita (Reyes *et al*., 2006).

3.2.1.6. Mineralización del distrito de Muzo-Quípama

Está localizada al occidente de Muzo, en las márgenes de la quebrada Itoco. Las características son similares a las de la zona de Coscuez: se halla en capas delgadas calcáreas del piso Hauteriviano-Barremiano, en el cierre del anticlinal de Alto de La Chapa-Borbur, y al igual que en Coscuez, presenta plegamientos frecuentes. La ocurrencia de las esmeraldas es en vetas de calcita, brechas hidráulicas y en "zonas" (figura 10). La minería es subterránea y la mineralogía dominante es calcita-dolomita-albita (Reyes *et al*., 2006).

3.2.1.7. Mineralización del distrito de La Pita

La zona de La Pita está localizada al noroccidente de Maripí, en la margen oriental del río Minero. En esta zona las minas forman una franja orientada, controlada por las rocas calcáreas inferiores del piso Hauteriviano-Barremiano, que indican un claro control estratigráfico de la mineralización (Reyes *et al*., 2006). Aunque también presenta las tres formas de mineralización, se destacan las brechas y la "zona", que impactan cuando se pasa del piso Valanginiano al piso Hauteriviano-Barremiano, lo cual da la apariencia de un brechamiento tectónico; sin embargo, lo que hay es una actividad hidrotermal fuerte, manifestada en un brechamiento hidráulico. La mineralogía dominante es calcita-dolomita-albita (Reyes *et al*., 2006).

3.2.2. Cinturón Esmeraldífero Oriental

El Cinturón Esmeraldífero Oriental se ubica en el flanco oriental de la cordillera Oriental, en una franja con dirección noreste. Al sur de esta región se presenta el embalse del Guavio, en la región de Gachalá y Ubalá, sobre el río Guavio, y al norte el embalse de Chivor, sobre el río Bata, en la zona de Garagoa, Macanal y Almeida (figura 11).

En los trabajos previos efectuados por Ingeominas (Ulloa, Camacho y Escovar, 1975), las mineralizaciones se localizaban en rocas de las formaciones Calizas de Guavio y Macanal. Los cortes de los distritos mineros de La Vega de San Juan, Mate Fique, Buenavista, Chivor y las de Oriente se ubicaban en rocas de la Formación Calizas de Guavio; las minas de El Diamante, Las Cruces, Providencia y Gualí, en rocas de la Formación Macanal.

Terraza *et al*. (2008) presentan una cartografía geológica-estructural y una caracterización estratigráfica actualizada de los cuerpos de roca aflorantes en el Cinturón Esmeraldífero Oriental, y concluyen que las unidades portadoras de las mineralizaciones de esmeraldas se restringen a rocas sedimentarias de edad Berriasiano. La descripción de los aspectos geológicos presentados en este capítulo se basa en (Terraza *et al*., 2008).

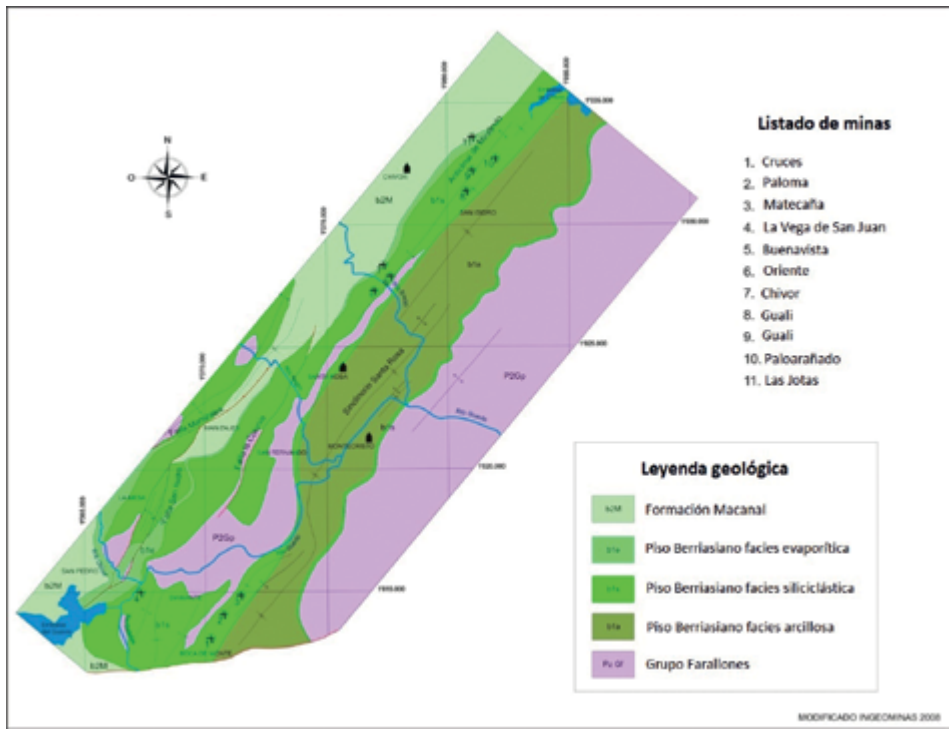


Figura 11. Mapa geológico del Cinturón Esmeraldífero Oriental

Fuente: Terraza *et al.* (2008)

3.2.2.1. Estratigrafía

Las rocas de edad Paleozoico (Grupo Farallones) formaban paleoaltos al momento del ingreso del mar cretácico durante el Berriasiano; esta paleotopografía controló la sedimentación y facilitó el desarrollo de facies isócronas heterópicas, lo que permitió la acumulación coetánea de arenitas o conglomerados en un sector, mientras en otros lugares se depositaban rocas de litología fina (arcillolitas) o facies evaporíticas.

Toda esta secuencia berriasiana se deposita discordantemente sobre las rocas paleozoicas del Grupo Farallones y es suprayacida por rocas valanginianas de la Formación Macanal (Terraza *et al.*, 2008).

Las mineralizaciones de esmeraldas se observaron en dos unidades de edad Berriasiano: una inferior, que se denomina piso Berriasiano-facies siliclástica, y otra superior llamada piso Berriasiano-facies evaporítica (figura 11).

Piso Berriasiano-facies siliciclástica (b1$_s$). Es una faja alargada, con dirección N35 °E, que aparece sobre el flanco occidental del Anticlinal de Miralindo, en los municipios de Ubalá y Chivor. Al sur, en el municipio de Gachalá y al norte de la quebrada El Frijolito, forma anticlinales y sinclinales pequeños (Terraza *et al.*, 2008). Esta unidad descansa discordantemente, con angularidad baja o alta, sobre rocas paleozoicas del Grupo Farallones; su límite superior, cuando se observa, es con el piso Berriasiano-facies evaporítica (figura 12).



Figura 12. Relación estratigráfica entre el piso Berriasiano-facies siliciclástica y el piso Berriasiano-facies evaporítica. Río Guavio, fotografía tomada desde La Vega de San Juan

Fuente: Terraza *et al.* (2008)

Litología. La sucesión que descansa sobre el Paleozoico presenta cambios laterales en la parte sur (municipio de Gachalá), donde se observan intervalos de conglomerados (20 m) en capas gruesas que se intercalan con capas de arcillolitas; estos intervalos disminuyen su espesor hacia el norte, e incluso cambian facialmente a secuencias de arenitas con cemento calcáreo en ocasiones, dispuestas en capas medianas intercaladas con capas de arcillolitas (Terraza *et al.*, 2008).

Sobre este paquete, en el sector de Gachalá (Palomas), se observa una sucesión de arcillolitas de espesor variable; en su parte baja es calcárea y presenta venas de calcita, lentes y láminas de pirita, y es aquí donde se localiza la minería de El Diamante, Mate Fique, Las Cruces y La Vega de San Juan.

Hacia el norte (sector de Santa Rosa y Buenavista), la base del piso Berriasiano-facies siliciclástica son arenitas de grano muy fino, algunas veces con cemento calcáreo, dispuestas en capas delgadas, medianas y gruesas, con contactos ondulosos que forman conjuntos de hasta 10 m (Ingeominas y Mora, 2005); sobre esta sucesión aparecen arcillolitas y lodolitas laminadas con bivalvos ornamentados del tipo descrito por Bürgl (1960) y Gaona (2001), hasta llegar a las secuencias observadas en los afloramientos del sector minero Buenavista (municipio de Ubalá) y Oriente (municipio de Chivor) (Terraza *et al*., 2008).

En Buenavista se pueden diferenciar segmentos lodosos y limosos; los paquetes lodosos están representados por arcillolitas a lodolitas negras, con laminación muy delgada y delgada. Por meteorización las rocas toman coloración gris claro y verde amarillento pálido. En los paquetes limosos las limolitas son micáceas, carbonosas, de color negro, en capas delgadas y medianas, con lentes de arenitas; ocasionalmente se presentan capas gruesas de arenitas cuarzosas, lodosas, de color gris verdoso. Es común observar pirita en lentes y láminas (Terraza *et al*., 2008).

Se presentan capas delgadas, láminas y lentes que toman coloración rojiza y ocre, de aspecto poroso y que los mineros denominan "cascoche", el cual corresponde al parecer a un proceso de lixiviación singenética durante la depositación, posiblemente por exposición subaérea, donde ocurre oxidación de cristales de pirita. Cuando dicho proceso tiene mayor magnitud se observa una roca de aspecto brechoso que alcanza a formar bolsones de hasta 3 m, y a veces se reconoce calcita. Las rocas presentan alteración albítica, que imprime un aspecto de compactación (Terraza *et al*., 2008).

Piso Berriasiano-facies evaporítica (b1$_e$). Es una franja delgada con dirección N35 °E, conformada por secuencias evaporíticas que muestran lateralmente cambios faciales a calizas y arenitas calcáreas. Afloran sobre el flanco occidental del anticlinal de Miralindo (figura 13); descansan sobre rocas siliciclásticas del Berriasiano, y son suprayacidas por arcillolitas de la Formación Macanal (Terraza *et al*., 2008).

Litología. En la región de Gachalá y Ubalá, en la confluencia de los ríos Chivor y Guavio, se observan dos intervalos estratigráficos: el inferior, de aproximadamente 100 m de espesor, corresponde a biomicritas-*packstone* de bivalvos en capas gruesas a medianas, que se intercalan con lodolitas y lodolitas calcáreas, y el segundo paquete (80 m) está compuesto de estromatolitos y pseudomorfos de evaporitas, en capas muy gruesas que se intercalan con intervalos arcillosos (Ingeominas y Mora, 2005).

En el intervalo de evaporitas se observan capas muy gruesas o conjuntos de capas delgadas y medianas de *boundstones*, con texturas enterulíticas, "*chicken wire*", estructuras nodulares empaquetadas y estromatolitos que se intercalan con micritas, arcillolitas calcáreas y arcillolitas en capas delgadas a medianas (Ingeominas y Mora, 2005).

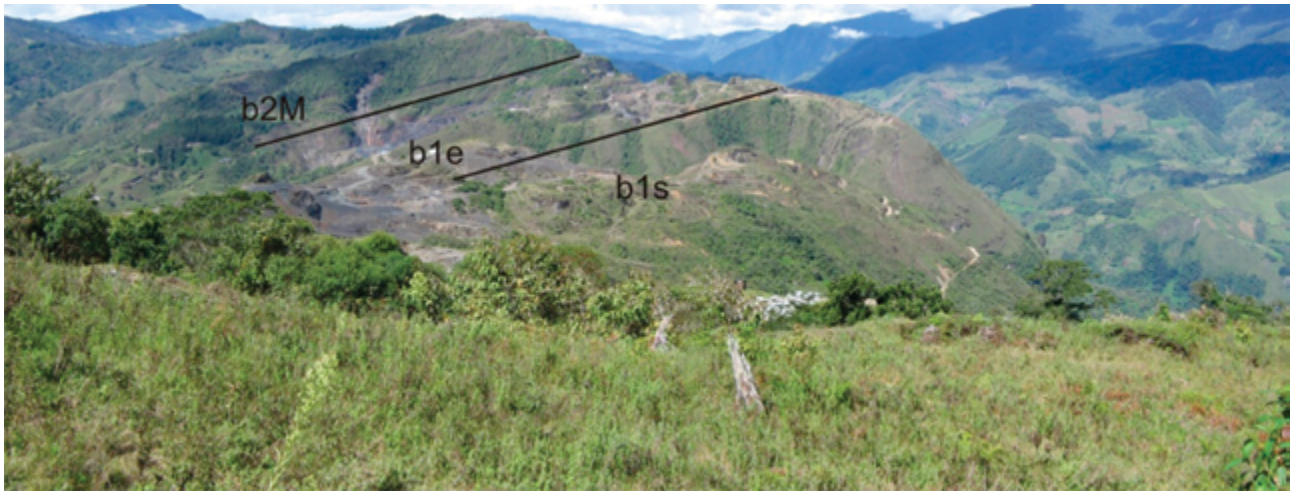


Figura 13. Relación estratigráfica del piso Berriasiano-facies siliciclástica (b1s) y evaporítica (b1e) y la Formación Macanal (b2M). Distrito minero de Chivor, fotografía tomada desde las minas de Buenavista

Fuente: Terraza et al. (2008)

En la región de Chivor se observan seis intervalos: tres evaporíticos dolomitizados y albitizados, separados por tres intervalos siliciclásticos también albitizados. En la parte alta del último paquete se observan, junto con estratos de arcillolitas, capas gruesas de biomicritas-*packstone* de bivalvos (Terraza *et al*., 2008).

El primer intervalo evaporítico (la base de la sucesión) está representado por capas gruesas de *boundstone*, con estructuras estromatolíticas intercaladas con capas gruesas de lodolitas, en ocasiones calcáreas; se observan también lentes y láminas de pirita. En el segundo intervalo evaporítico se presentan capas muy gruesas de *boundstone*, intercaladas con capas gruesas de limolitas y lodolitas interlaminadas. Los *boundstone* son láminas y lentes de diferente coloración (gris verdoso, gris verdoso pálido y gris), y del mismo tamaño de grano. Es común ver láminas que se curvan y terminan bruscamente. En el último intervalo se observan capas gruesas de biomicritas-*packstone* de bivalvos, lodolitas y lodolitas calcáreas, y *boundstones* con estructuras estromatolíticas (Terraza *et al*., 2008).

3.2.2.2. Geología estructural

Las rocas paleozoicas del Grupo Farallones afloran como núcleos de anticlinales mayores, a veces con algunos pliegues menores asociados, y las unidades cretácicas presentan bastantes pliegues anticlinales y sinclinales muy apretados, en su mayoría de poca longitud (Terraza *et al*., 2008) (figura 11).

Anticlinal de Miralindo. Se extiende de sur a norte desde la cuchilla de Miralindo hasta el norte del embalse de Chivor. Tiene una longitud de al menos 30 km y una amplitud de aproximadamente 3 km. Esta estructura se desarrolla en los pisos Berriasiano-facies siliciclásticas y evaporítica; su núcleo por erosión, en el sector de Miralindo, va muy cerca del contacto discordante con el Grupo Farallones, pero hacia el norte transcurre dentro de la misma unidad y es asimétrico (el flanco oriental más inclinado) (Terraza *et al*., 2008).

Sinclinal de Santa Rosa. Este pliegue va por un valle creado entre dos altos que forma el Grupo Farallones y se extiende desde la falla del Fríjol hasta el norte del embalse de Chivor. Se trata de un sinclinorio formado por varios pliegues de poca amplitud y longitud, aunque la estructura principal tiene una amplitud de 4 km y una longitud superior a los 40 km. En general, se comporta como un pliegue simétrico (Terraza *et al*., 2008).

Falla del Fríjol. Está localizada en la parte sur, entre las localidades de Gachalá y Algodones. Es una falla con dirección N80 °E; su expresión en superficie es evidente, lo que sugiere desplazamiento sinestral; en la vertical se infiere claramente por las relaciones estratigráficas: el bloque norte se levanta sobre el bloque sur. Pone en contacto rocas del Grupo Farallones y del piso Berriasiano-facies siliclástica con rocas de la Formación Macanal (Terraza *et al*., 2008).

Falla La Colonia. Se extiende desde la cuchilla de Malacara hasta la cuchilla de Miralindo, con orientación N30 °E; muestra vergencia al oriente. Al sur pone en contacto el Grupo Farallones con rocas del piso Berriasiano-facies siliciclástica y hacia al norte repite esta sucesión (Terraza *et al*., 2008).

Falla de San Isidro. Se extiende desde la localidad de Gachalá al sur, hasta la falla de Manizales; tiene una dirección N45 °E, con vergencia al oriente con movimiento transcurrente dextral de poca magnitud. Al sur, repite parte del piso Berriasiano facies-evaporítica y Paleozoico, y al norte repite rocas de la Formación Macanal (Terraza *et al*., 2008).

3.2.2.3. Mineralización y minas del Cinturón Oriental T3

Al municipio de Gachalá le pertenecen los distritos mineros localizados al sur, cuyas minas más conocidas son Las Cruces, El Diamante y La Vega de San Juan, y al norte, en los municipios de Chivor, Macanal y Ubalá se localizan los sectores productivos de Buenavista, Chivor, Oriente, Gualí y Paloarañado, entre otros (figura 11).

De las observaciones realizadas en campo y los estudios detallados se puede concluir lo siguiente:

- La mineralización de esmeralda, en el Cinturón Esmeraldífero Oriental, está ubicada en rocas del piso Berriasiano-facies siliciclástica y evaporítica. En la región de Gachalá, la mineralización se encuentra en las arcillolitas calcáreas basales de piso Berriasiano-facies siliclástica, tal como se observa en El Diamante y Las Cruces; este mismo intervalo, plegado, aflora nuevamente y es el explotado en La Vega de San Juan. En el sector de Buenavista las minas de esmeraldas se observan en las partes media y alta del piso Berriasiano-facies siliciclástica (Terraza *et al*., 2008).
- En los municipios de Chivor, Ubalá y Macanal, las minas productivas se localizan en el piso Berriasia-

no-facies evaporítica; hacia el norte, en el municipio de Macanal, existe la mina Agua Blanca, que en los estudios previos de Ingeominas (Ulloa, Camacho y Escovar, 1975) estaba en la Formación Macanal, pero con bioestratigrafía se determinó su posición en una escama estructural del piso Berriasiano-facies evaporítica, producida por una falla que repite secuencia. Hasta ahora no se ha encontrado mineralización en rocas de la Formación Macanal (Terraza *et al*., 2008).

La mineralogía observada para el piso Berriasiano facies-siliciclástica la reportaron Hall (1976) y Escovar (1975):

- Plagioclasa sódica (oligoclasa).
- Dolomita-berilo-pirita-calcita.
- Trazas de rutilo y fluorita.
- Caolín está presente en Buenavista.

La mineralización para el piso Berriasiano facies-evaporítica por difracción de rayos X es la siguiente:

- Albita-dolomita-pirita.
- Calcita no siempre abundante.
- Cuarzo-illita.

Seguidamente se describirán algunas características de las mineralizaciones de este cinturón:

La mineralización de Las Cruces-El Diamante-El Toro-Mate Caña-La Vega de San Juan está localizada al norte de Gachalá; las rocas que hospedan la mineralización son arcillolitas carbonosas calcáreas, de la parte más baja del piso Berriasiano-facies siliciclástica. La mineralización se observa en vetas, zonas albitizadas y, en menor proporción, en brechas hidrotermales. La minería se realiza a cielo abierto y en túneles, en tanto que la mineralogía es albita-calcita-dolomita (Terraza *et al*., 2008).

En este sector, en la mina de Las Cruces, se encontró la esmeralda La Emilia, de 6900 quilates (Q), considerada la de mayor tamaño en el mundo que actualmente se encuentra en Europa (Martín de Retana y Moller, 1990).

3.2.2.4. Mineralización de Buenavista-Gualí

Las minas pertenecientes a estos sectores se encuentran en las partes media y alta del piso Berriasiano-facies siliclástica; no es claro su modo de presentación; las limolitas y lodolitas se observan de color amarillo rojizo (manchadas de rojo por óxidos de hierro), porosas ("cascoche"), y en ocasiones formando bolsones, compuestos por fragmentos de lodolita envueltos por cemento rojizo con pirita. La minería en general es a cielo abierto y la mineralogía es de albita-cuarzo-illita-pirita (Terraza *et al*., 2008).

3.2.2.5. Mineralización de Chivor-Oriente-Paloarañado

Las minas están en toda la sucesión del piso Berriasiano-facies evaporítica. Las mineralizaciones se observan en los intervalos de *boundstone* y en las rocas arcillosas, y se encuentran en las estructuras evaporíticas "*chicken wire*", en las estructuras nodulares, en vetas que atraviesan los *boundstone* y en zonas albitizadas de capas arcillosas (figura 14). La minería es subterránea y la mineralogía dominante es albita-dolomita-pirita y más o menos calcita, acompañados de cuarzo e illita (Terraza *et al*., 2008).

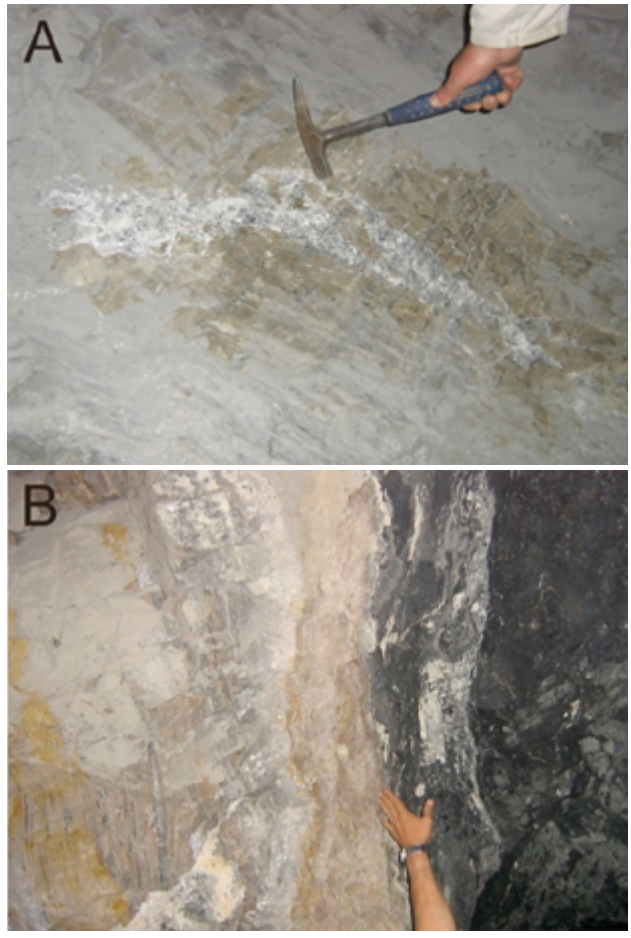


Figura 14. A. Veta mineralizada cortando evaporitas B. zona albitizada en el contacto evaporita-lodolita Mina de Oriente, municipio de Chivor (Boyacá)

Fuente: Terraza *et al.* (2008)

En el frente San Francisco se halló una gema de 632 Q, con 8 cm de alto por 5.5 cm de diámetro, llamada La Patricia, la cual se encuentra en el Museo de Historia Natural de Nueva York (Martín de Retana y Moller, 1990).

3.2.3. Origen de los depósitos colombianos de esmeralda

Para los depósitos de esmeraldas en Colombia se han propuesto dos teorías: una de origen ígneo y otra de origen sedimentario.

3.2.3.1. Origen ígneo

Restrepo (1961) y Hall (1976) plantean que los fluidos mineralizantes son de origen ígneo-pegmatítico-neumatolítico. Para Restrepo (1961) las principales características de la mineralización son:

- Minerales primarios: cuarzo-feldespato.
- Minerales accesorios: berilo-parisita-apatito-fluorita-mica.
- Minerales de remplazamiento: calcita-dolomita-barita-pirita.
- Minerales de alteración: limonita-azufre-caparrosa (sulfato de cobre).

Para Hall (1976) estas son las principales características de la mineralización:

- Estado uno: fracturas rellenadas por calcita.
- Esmeralda y muchos silicatos precipitados en espacios vacíos dentro de las fracturas.
- Generación de minerales de carbonatos.

3.2.3.2. Origen sedimentario: interacción roca (calcárea-carbonosa) con fluidos hipersalinos de procedencia evaporítica

Los yacimientos de esmeraldas en Colombia están localizados en rocas sedimentarias de carácter calcáreo-carbonoso, que constituyen el piso Hauteriviano-Barremiano y la Formación Rosablanca en el Cinturón Esmeraldífero Occidental, y rocas de los pisos Berriasiano-facies siliciclásticas y facies evaporítica para el Cinturón Esmeraldífero Oriental. Las esmeraldas aparecen en brechas hidrotermales, zonas albitizadas, vetas y venas, y la mineralogía predominante es calcita-albita-dolomita-esmeralda-pirita.

Este tipo de mineralización ha sido tema de estudio de varios autores a partir de los años noventa, como Ottaway (1991); Giuliani., et al, 1992.; Cheilletz *et al.* (1994); Ottaway *et al.* (1994), y Giuliani *et al.* (1995), quienes por microtermometría en inclusiones fluidas y análisis isótopos estables establecen el origen, naturaleza de fluidos y temperaturas de entrampamiento; además, realizan estudios de la maduración de la materia orgánica para las rocas que hospedan la mineralización, con los siguientes resultados:

- "Estudios microtermométricos Sonda Raman y SEM indican la presencia de sales ricas en H_2O-NaCl-KCl-KCl_2-CO_2-N_2, incluidas en las esmeraldas (Ottaway, 1991; Ottaway *et al.*, 1994) y en carbonatos y pirita" (Giuliani *et al.*, 1990a, 1990c, 1990d; Cheilletz *et al.*, 1994, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004), "en donde la composición de los fluidos encontrados en estos minerales es homogénea y similar para los dos cinturones" (Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).
- "Estudios de microtermometría en inclusiones primarias de esmeraldas, cuarzo y fluorita, en depósitos de los dos cinturones, indican que las inclusiones fluidas tienen una salinidad aproximada de 40 % en peso de NaCl y que pueden contener cantidades significativas de Ca, K, Fe y Mn. De igual manera, identificaron los siguientes minerales: halita, calcita, dolomita, parisita, siderita, pirita, esfalerita y silicatos" (Kozlowski *et al.*, 1988; Giuliani *et al.*, 1993, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).
- Las inclusiones fluidas arrojaron los siguientes resultados: la presencia de salmueras $CaCl_2$-NaCl está claramente evidenciada por SEM (*scanning electron microscopy*) y por las temperaturas eutécticas que van desde "56.1 hasta –31.6 °C. Los rangos de halita Tf (Tf_h) están entre 284 y 326 °C. La temperatura de homogeneización líquido-vapor está entre 215 y 330 °C. La combinación de Tf_h y Tmi permitió la estimación de la salinidad total del fluido: $(H_2O)_{55}$ - $(NaCl)_{30}$ - $(CaCl_2)_{15}$. La constante Tf_h mostró que el fluido fue esencialmente homogéneo en la temperatura de cierre, mientras que varios Tf_h > 300 °C para Th = 250 °C indican que la solución estuvo en el límite de la saturación. En este caso, se puede admitir que Tf_h puede ser la temperatura real de formación de la inclusión (T = 300 -350 °C, P = 1.3-1.5 Kb) (Giuliani *et al.*, 1991, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).
- "Estudios de isótopos de azufre, realizados en piritas sincrónicas con la mineralización de esmeralda, varían de $\delta^{34}S$ + 14.8 a 19.4 %, mientras la pirita sedimentaria de los *shales* negros da -2.4 %; esto sugiere la ausencia de participación de fuentes sulfurosas magmáticas o de *shales* negros del Cretácico temprano. Los valores altos ($\delta^{34}S$) involucran la reducción de sulfatos evaporíticos sedimentarios marinos a sulfuros hidrogenados por la interacción con estratos ricos en materia orgánica" (Giuliani *et al.*, 1995a, 1995b, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).
- El estudio de fluidos sugiere dos tipos: el fluido E (inclusiones en esmeraldas y fluoritas) fue relativamente oxidante y dominado por Na^+, Cl^- y $(SO_4)^{2-}$, con bajos niveles en otros cationes y reaccionó con lutitas

negras, causando blanqueamiento por oxidación termoquímica de la materia orgánica, por $(SO_4)^{2-}$ para producir sulfuro reducido y CO_2, y liberar metales como Cr, V, Be; dentro de la solución y el fluido Q (inclusiones de cuarzo) fue más reductor y estuvo dominado por Na, Ca y Cl, con altos niveles de Fe, Pb, Zn, Ba, Sr, etc., y es el responsable de la depositación de fluorita, pirita, dolomita y parisita" (Banks *et al*., 1995, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).

En resumen, los estudios de los fluidos de las inclusiones indican que los fluidos mineralizantes que precipitaron las esmeraldas eran altamente salinos, con temperaturas de formación entre 300 y 350 °C, presiones mínimas de confinamiento entre 900 y 1000 bares, cercanos a la superficie y que tuvieron una sola fuente, sin relación con magmatismo.

Con respecto a los análisis radiométricos, se efectuaron dataciones Ar^{40}/Ar^{39}, en moscovita verde rica en Cr y V de muestras del cinturón occidental (Muzo), que dieron edades de 36 ± 3 Ma para los depósitos de Coscuez, y 32 ± 3 Ma para el depósito de Muzo-Quípama (Cheilletz *et al*., 1994, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).

En el cinturón oriental se dataron muestras de moscovita de venas por el método Ar^{40}/Ar^{39} y las edades calculadas fueron de 65.0 ± 1.9 Ma, y 65.2 ± 1.4 Ma (Cheilletz *et al*., 1997, citados en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).

Mediante estudios Rb^{87}, Sr^{86}, usando errócronas con contenido geológico, establecieron una edad de 67 Ma para los depósitos del Cinturón Occidental (Muzo), y otra de 61 Ma para el Cinturón Oriental (Chivor) (Romero, Schultz y Kawashita, 2000).

3.3. Situación actual de la minería

En cuanto al tema esmeraldífero en Colombia, se tiene la siguiente situación actual:

3.3.1. Potencial

Las áreas potencialmente promisorias para la exploración de esmeraldas se encuentran en sectores aledaños a los cinturones esmeraldíferos o cercanos a los distritos mineros conocidos, sobre todo en lugares que presenten características estratigráficas y tectónicas específicas, como las que poseen el piso Valanginiano inferior o piso Hauteriviano-Barremiano para el Cinturón Esmeraldífero Occidental, y las del piso Berriasiano-facies siliclástica o evaporítica para el Cinturón Esmeraldífero Oriental.

Para estas zonas se deben seguir las siguientes etapas:

3.3.1.1. Métodos de prospección

La prospección debe estar dirigida a la búsqueda de nuevas áreas. Para prospectar la mineralización de esmeraldas en Colombia se debe elaborar una cartografía geológica detallada, que permita hacer la delimitación precisa de las unidades que hospedan la mineralización y su posición dentro de estas. Dicha labor inicial se complementa con la utilización de métodos geoquímicos y geofísicos. Para la prospección geoquímica se han realizado campañas de muestreo de sedimentos activos, donde se pretende delimitar zonas anómalas (por adicción o defecto); de igual manera, se emplean propiedades físicas de las rocas (magnetismo, resistividad, radiactividad, etc.) con este mismo propósito.

Geología. Reyes *et al.* (2006) presentan un trabajo sistemático de cartografía geológica con fines exploratorios en el Cinturón Esmeraldífero Occidental; para tal propósito, se realizó el levantamiento detallado de la cartografía geológica a escala 1:25 000, con un estricto control bioestratigráfico, lo cual permitió localizar con precisión los niveles estratigráficos que contienen las mineralizaciones de esmeraldas. Esta misma metodología se desarrolló en el Cinturón Esmeraldífero Oriental.

En el Cinturón Esmeraldífero Occidental las unidades hospedantes de las mineralizaciones corresponden a la Formación Rosablanca (piso Valanginiano Inferior) y al conjunto litológico calcáreo-siliciclástico (piso Hauteriviano-Barremiano); a su vez, en el Cinturón Esmeraldífero Oriental los depósitos de esmeraldas se han encontrado en rocas del piso Berriasiano-facies siliciclástica y facies evaporítica, suprayacentes a rocas del Paleozoico (Grupo Farallones) e infrayacentes a la Formación Macanal.

Geoquímica. El objetivo de la exploración geoquímica es la identificación de zonas con concentraciones de elementos mayores (anomalía) superiores al valor promedio, normal o modal (línea base). La línea base se define como la concentración promedio que tiene un elemento en una roca de un tipo particular, valor que se puede determinar a partir de los resultados de los análisis químicos de muestras.

Los valores que sean más altos que la línea base indican un enriquecimiento con respecto a esta y, por tanto, la presencia de un cuerpo mineralizado. A estos valores se les denomina anomalía geoquímica, razón por la cual su correcta determinación es compleja: el valor que separa la línea base de la anomalía se llama umbral y generalmente se halla a partir de un cuidadoso análisis estadístico de la información geoquímica disponible (García y Moreno, 2006a, 2006b).

En general, los principales aspectos que se deben tomar en cuenta para un trabajo geoquímico son los siguientes Bustillo y López, 1996; García y Moreno, 2006a, 2006b):

- Identificación del tipo de yacimiento que hay que investiga
- Naturaleza de los posibles halos primarios y secundarios.
- Tipos de muestreo (sedimentos activos, suelos).
- Diseño de muestreo. Intervalo, orientación y densidad de malla.
- Análisis de laboratorio. Determinación de la concentración de elementos de interés.
- Análisis estadístico y geoestadístico. Determinación de valores de línea base y anomalía geoquímica.

3.3.1.2. Delimitación de zonas de interés

En el área del Cinturón Esmeraldífero Oriental Escovar (1975) efectuó estudios geoquímicos, a lo largo de los cuales recolectó y analizó 299 muestras de roca, 590 de suelo y 14 de sedimentos activos. Las muestras se analizaron por absorción atómica para Na, Li, K, Sr, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Mo y Be. También se colectaron 60 muestras de roca y 18 de suelo en áreas con características similares a las áreas mineralizadas con esmeraldas, sin resultados positivos.

Los análisis efectuados demuestran que los mejores indicadores de la mineralización de esmeraldas a nivel local son, en su orden, los siguientes: Na, Li, Ba, K y Pb. El Mo, el Sr y el Zn son buenos indicadores regionales, mientras que el Cu y el Ni resultan poco útiles en la exploración. El Be sirve para entender la génesis de los depósitos y, en menor proporción, como guía exploratoria (Escovar, 1975).

Con el fin de encontrar un indicador del coeficiente del grado de alteración metasomático (M) que diera un contraste mayor en la exploración detallada y regional, se crearon las siguientes fórmulas (M_1 para exploración detallada y M_2 para exploración regional):

$$M_1 = \frac{\log(\%Na)^3}{L\ (ppm) * K(\%) * Ba\ (ppm)}$$

$$M_2 = \frac{\log(\%Na)^3}{L\ (ppm) * K(\%) * Ba\ (ppm)}$$

Las fórmulas se han utilizado con buenos resultados, lo cual se observa al comparar histogramas de mineralizaciones dentro del distrito minero y fuera de este, mostrando distribuciones muy diferentes (Escovar, 1975).

La eficacia de los métodos geoquímicos radica en que los diseños de baja resolución (baja densidad) (Vargas *et al*., 2001) ayudan a delimitar zonas de interés en las cuales un muestreo de mayor resolución (alta densidad) permitirá precisar la extensión del área potencialmente mineralizada (García y Moreno, 2006b).

En el caso de un muestreo de baja densidad, elementos guía tales como K y La (en general, lantánidos o tierras raras), a escala regional marcan grandes provincias geoquímicas de dirección SW-NE, localizadas en los flancos W y E de la cordillera Oriental, caracterizadas por valores mayores de la línea base (anómalos), y restringen a su vez la potencialidad de la zona axial de la cordillera Oriental debido a un contraste negativo con respecto a los cinturones esmeraldíferos Occidental y Oriental, donde se hospedan las mineralizaciones (figuras 15 y 16).

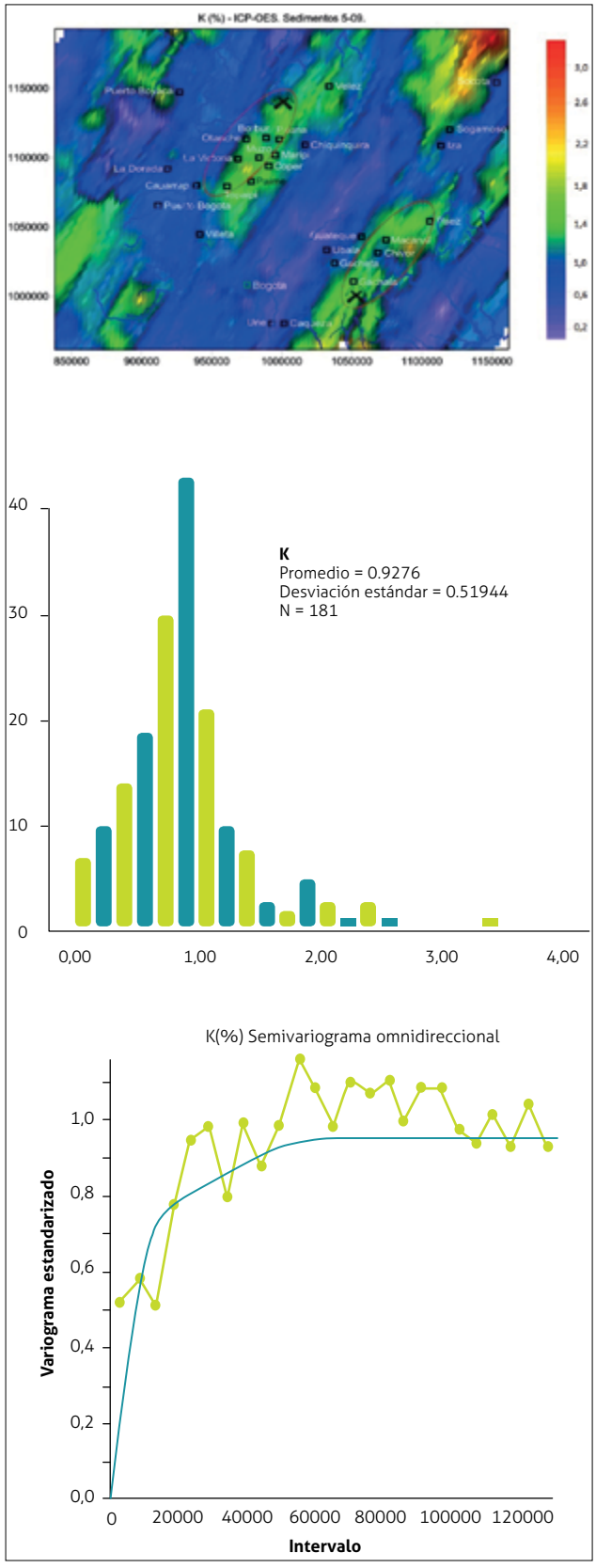


Figura 15. Análisis estadístico-geoestadístico de la distribución de potasio (K) para la definición regional de zonas de interés

Fuente: Vargas *et al.* (2001)

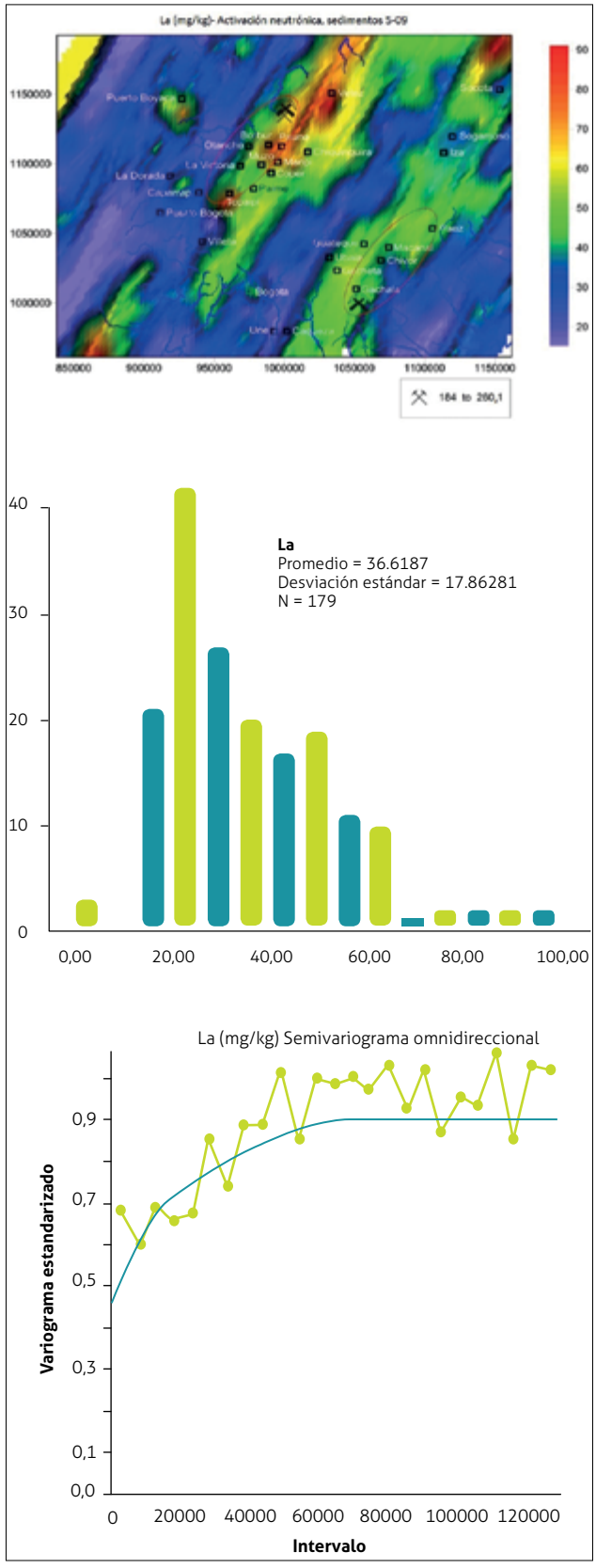


Figura 16. Análisis estadístico-geoestadístico de la distribución de lantano (La) para la definición regional de zonas de interés

Fuente: Vargas *et al.* (2001)

3.3.1.3. Geoquímica isotópica

En el convenio interinstitucional entre Ingeominas y la Universidad Industrial de Santander (UIS), se definieron criterios para exploración de esmeraldas a partir de los resultados de los análisis efectuados a las muestras recolectadas en las minas productivas de esmeraldas (Mantilla *et al*., 2007):

- La cristalinidad de la illita $2M_1$ indica que las condiciones de temperaturas máximas en las rocas donde se hospeda la mineralización (piso Hauteriviano-Barremiano) se proyectan en el campo de la anquizona e incluso en el de la epizona, y la madurez de los componentes orgánicos apunta en ese sentido.
- Las inclusiones en los minerales que acompañan la esmeralda siempre presentan temperaturas de homogeneización desde 300 hasta 350 °C, y la química de dicha muestra indican que están sobresaturadas en sales. Además, los estudios destacan presencia de CO_2 y N_2 en los volátiles analizados en diferentes materiales de rellenos en venas mineralizadas.
- La composición isotópica de carbonatos y sulfuros en piritas presentes en venas tiene valores ligeros (negativos), en comparación con materiales donde no hay mineralización, que son valores pesados.

3.3.1.4. Geofísica

En la prospección geofísica para esmeraldas es aconsejable conocer la geología superficial, estratigrafía, tipo de depósito, química y mineralogía, para poder definir el método más adecuado. En general, los principales métodos geofísicos empleados son, según (Gilart, 2004), los siguientes: radiométricos (espectrometría y emanometría), electromagnéticos (VLF), magnéticos y geoeléctricos (IP y resistividad).

Para la prospección de los depósitos esmeraldíferos se emplean los métodos geofísicos de espectrometría, emanometría, magnetometría, geoeléctrica y electromagnetismo, en áreas en las que previamente se hayan identificado anomalías geoquímicas.

En los dos cinturones esmeraldíferos se han utilizado métodos geofísicos de radiometría, resistividad, electromagnetismo, espectrales, los cuales han dado estos resultados:

- Fuentes magnéticas a profundidad indican la presencia de minerales diamagnéticos que se pueden asociar con sales, yeso, anhidrita y calcita, mientras que paramagnéticos se asocian con sulfuros de hierro como la pirita (Vásquez, 2003, citado en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).
- Se presentan contrastes en la radiactividad de U, Th y K, que permiten discriminar litologías calcáreas (Formación Rosablanca en el Cinturón Esmeraldífero Occidental y piso Berriasiano-facies evaporítica en el Cinturón Esmeraldífero Oriental), y siliciclásticas (Formación Capotes en el Cinturón Esmeraldífero Occidental y Formación Macanal en el Cinturón Esmeraldífero Oriental). Por otro lado, las zonas de alteración presentan valores bajos de la relación eTh/K ($5*10^{-5}$), lo que indica bajas concentraciones de K posiblemente por el remplazo de Na y valores altos de U/Th (1 a 12) relacionados con zonas mineralizadas (Vásquez, 2006).
- Radiometría, emanometría, magnetometría, geoeléctrica y electromagnetismo se usaron en áreas previamente seleccionadas por geoquímica en Chivor y Macanal, en zonas con actividad minera, para patronarlas y posteriormente emplearlas en zonas de interés sin actividad minera. Los estudios sirvieron para identificar tres corredores correlacionables con sistemas de fallas y definir así anomalías magnéticas (Ochoa, 2003, citado en Maya, Buenaventura y Salinas, 2004).

Por lo regular, los estudios geofísicos están orientados a encontrar rasgos generales, como fallas, pliegues, zonas con minerales magnéticos o radiactivos, que pueden estar asociados con mineralizaciones de esmeraldas, pero no así para detectarlas directamente.

3.3.1.5. Métodos de perforación-túneles exploratorios

Después de haber realizado los métodos exploratorios mencionados, y si se conoce la existencia en superficie de manifestaciones u ocurrencias de esmeraldas y se requiere evaluar el depósito en las tres dimensiones, es necesario efectuar perforaciones o túneles exploratorios antes de hacer los estudios detallados de cartografía geológica, geoquímica, geofísica e interpretación de datos de superficie proyectados en subsuelo.

3.3.2. Comercio

Con respecto al tema de comercio, producción, exportaciones y perspectivas para Colombia se tiene lo siguiente:

3.3.2.1. Producción

Para el 2013 Colombia ocupaba el segundo puesto en producción de esmeraldas a nivel mundial: el ranking tiene a Zambia (37 %), Colombia (33 %), Brasil (15 %), Pakistán, Madagascar y Zimbabue, cada uno con el 5 % (*El Universal*, 2013).

La producción de esmeraldas en el periodo 1995-2016 (figura 17) (UPME, 2017), presentó dos tendencias: la primera entre 1995-2006, con un promedio de 7 000 000 Q y la segunda entre 2007-2016, con un promedio de 3 000 000 Q, significando una reducción de más del 50 %; no obstante, las esmeraldas continúan siendo las de mejor calidad a nivel mundial.

La Agencia Nacional de Minería reportó para el 2017 los datos de producción de esmeraldas referenciados en la tabla 3 para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Agencia Nacional de Minería, 2018).

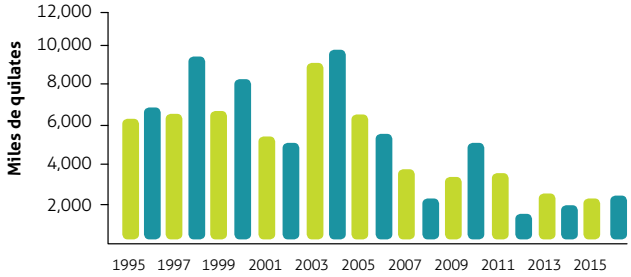


Figura 17. Comportamiento de la producción colombiana de esmeraldas
Periodo 1995-2016 (miles de quilates)

Fuente: UPME y SIMCO (2017)

Tabla 3. Producción de esmeraldas en el 2017

Departamento	Municipio	Esmeraldas bruto (quilates)	Esmeraldas engastadas (quilates)	Esmeraldas talladas (quilates)
Boyacá	Chivor	14 794.00	0.00	560.13
	Maripí	49 623.45	15.40	30 882.74
	Muzo	1 759 238.07	113.79	133 536.21
	Pauna	440.00	0.00	0.00
	Quipama	283 882.70	0.00	26 871.02
	San Pablo de Borbur	20 654.33	330.42	75 911.19
Cundinamarca	Gachalá	5200.00	0.00	9524.48
	Ubalá	83.00	0.00	0.00
Total		2 133 915.56	459.61	277 285.77

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

3.3.2.2. Exportaciones

El grueso de la producción de esmeraldas se destina a la exportación. Se calcula cerca del 98 % del volumen producido es exportado y solo un 2 % se queda en Colombia (UPME, 2016).

Las esmeraldas se exportan actualmente en tres presentaciones: piedras talladas, piedras engastadas y piedras en bruto; no obstante, el 98 % de los quilates exportados en bruto en el 2015 correspondió a morrallas de mínimo valor (UPME, 2016).

4. Aspectos ambientales y sustitutos

El berilio es un metal que puede ser muy perjudicial cuando es respirado por los humanos, porque puede dañar los pulmones y causar neumonía. El efecto más comúnmente conocido es la llamada beriliosis, una peligrosa y persistente enfermedad de los pulmones que puede incluso dañar otros órganos, como el corazón. Cerca del 20 % de todos los casos de berioliosis terminan con la muerte del paciente. La causa de la beriliosis es la respiración de berilio en el lugar de trabajo. Las personas con el sistema inmune debilitado son más sucestibles a padecer esta enfermedad.

También causa reacciones alérgicas en personas que son hipersensibles a los productos químicos. Estas reacciones pueden ser muy agudas y pueden hacer que la persona caiga gravemente enferma, con una afección conocida como enfermedad crónica por berilio. Los síntomas son debilidad, cansancio y problemas respiratorios. Algunas personas que sufren de esta enfermedad pueden desarrollar anorexia, y las manos y los pies se les ponen azules. En algunas personas puede causar la muerte. El berilio puede también incrementar las posibilidades de desarrollar cáncer y daños en el ADN.

Este metal entra en el aire, el agua y el suelo como resultado de procesos naturales y actividades humanas. Esto ocurre de forma natural en el medio ambiente en pequeñas cantidades, y es probable que no se mueva hacia la zona profunda del suelo y no entre en contacto con el agua subterránea; por su parte, el hombre añade berilio a

través de la producción de metal y de la combustión de carbón y aceite.

El berilio existe en el aire en pequeñas partículas de polvo. Entra en el agua durante los procesos de desintegración de suelos y rocas. Las emisiones industriales añaden berilio al aire y al agua residual, y estos serán posteriormente traspasados al agua. Normalmente precipita en el sedimento. El berilio como elemento químico está presente en los suelos en pequeñas cantidades de forma natural, pero las actividades humanas han incrementado esos niveles. Es probable que el berilio no se mueva hacia la zona profunda del suelo y no entre en contacto con el agua subterránea.

Ciertos elementos químicos reaccionan con el berilio en el agua haciéndolo insoluble. Esto es bueno, porque la forma insoluble del berilio en agua causa mucho menos daño a los organismos que la forma soluble. El berilio no se acumula en los cuerpos de los peces, pero algunas frutas y vegetales como los fríjoles y las peras pueden contener niveles significativos. Estos niveles pueden entrar en los animales cuando esos alimentos son consumidos, pero por suerte la mayoría de los animales excretan el berilio rápidamente a través del sistema urinario y fecal.

Las pruebas de laboratorio han indicado que es posible que el berilio produzca cáncer y cambios en el ADN de los animales, aunque por el momento no hay evidencia de estudios de campo que respalde estos descubrimientos (Lenntech, s.f).

Referencias

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

Beus, A. (1966). *Geochemistry of beryllium and genetic types of beryllium deposits.* San Francisco: Freeman.

Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P., Laumonier, B. y Giuliani, G. (2002). Andean deformation and rift inversion, eastern edge of cordillera Oriental (Guateque-Medina Area), Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(4), 391-407.

Bürgl, H. (1960). El Jurásico e Infracretáceo del río Batá, Boyacá. *Boletín Geológico*, *6*, 169-211.

Bustillo, M. y López, C. (1996). *Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, impacto ambiental.* Madrid: Gráficas Arias Montano.

Cheilletz, A., Feraud, G., Giuliani, G., Rodríguez, F. (1994). Time-pressure-temperature constrains on the formation of Colombia emeralds: A laser-probe and fluid inclusion study. *Economy Geology*, 89, 362-380.

Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P. y Rudkiewicz, J. (1990). Tectonic style and crystal structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross section. *in Letouzey, J., ed., Petroleum and Tectonics in Mobile Belts: Paris, Editions Technip, Petroleum and Tectonic in Mobile Belts*, 81-100.

Escovar, R. (1975). Geología y geoquímica de las minas de esmeralda de Gachalá (Cundinamarca). *Boletín Geológico. Informe 1684*, XXII, 119-153.

Etayo Serna, F., Renzoni, G. y Barrero, D. (1976). Contornos sucesivos del mar Cretácico. *Memoria del Primer Congreso Colombiano de Geología. Ciudad Universitaria, Universidad Nacional de Colombia.* Bogotá.

Evans, A. (1995). *Ore geology and industrial minerals: an introduction.* Londres: Blackwell Science.

Forero, H. (1987). *Esmeralda*. En Ingeominas, *Recursos minerales de Colombia* (tomo II), 565-1190. Bogotá: Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas.

Gaona, T. (2001). *Los moluscos bivalvos, excepto Trigoniidae, de las formaciones Cumbre y Batá y su significado paleoambiental* (Trabajo de grado). Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.

Garcés, H. (1995). *Geología económica de los yacimientos minerales - Yacimiento de Colombia - Minerales metálicos.* Medellín: Clave.

García, C. y Vargas, C. (1970). Proyecto minero para las minas de Muzo y Coscuez (Colombia, Suramérica). *Segundo Congreso Colombiano de Minería* 1-61. Bogotá.

García, O. y Moreno, G. (2006a). Herramientas de análisis estadístico y espacial aplicadas en la separación línea base-anomalía geoquímica. Implicaciones en exploración de recursos naturales, parte 1: Revisión metodológica. *Geología Colombiana*, 31, 27-38.

García, O. y Moreno, G. (2006b). Herramientas de análisis estadístico y espacial aplicadas en la separación línea base-anomalía geoquímica. Implicaciones en exploración de recursos naturales, parte 2: Zinc en sedimentos activos plancha 5-09 y 208-Villeta, Colombia. *Geología Colombiana*, 31, 39-56.

Gilart, R. (2004). Métodos geofísicos más utilizados en la exploración de minerales industriales. *VII Quincena de la Investigación*. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F., Baker, J. (1995). An Evaporitic Origin of the Parent Brines of Colombian Emeralds: Fluid Inclusion and Sulphur Isotope Evidence. *European Journal Of Mineralogy*, *7*, 151-165.Giuliani, G., Sheppard, S., Cheilletz, A., & Rodriguez, C. (1992). Contribution de l´etude des phases fluids et de la géochimie isotopique 18O/16O, 13C/12C à la genèse des gisements d´émeraude de la Cordillère Orientale de la Colombie. Paris: Comptes Rendus des l'Academie des Sciences. Paris, t. 314, Série II, 269-274

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

Guilbert, J. y Park, J. (1986). *The Geology of Ore Deposits*. 4th ed. W. H Fremman, New York.

Hall, M. (1976). Mineralogía y geoquímica de las vetas esmeraldíferas de Muzo, departamento de Boyacá con implicaciones en la prospección futura de esmeraldas en otras partes de Colombia. *Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, XIII*. Bogotá.

Hurlbut, C. y Klein, C. (1984). *Manual de mineralogía.* Madrid: Reverté.

Ingeominas y Mora, A. (2005). *Levantamiento de información estratigráfica y estructural de los cinturones esmeraldíferos de la cordillera Oriental.* Bogotá, Ingeominas. Inédito.

Klein, C., Hurlbut, C., & Dana, J. (1993). Manual of mineralogy (after James D. Dana) 21th edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Lenntech. (s.f). Propiedades químicas del Berilio - Efectos del Berilio sobre la salud - Efectos ambientales del Berilio. Disponible en https://www.lenntech.es/periodica/elementos/be.htm

Mantilla, L., Silva, A., Serrano, J., Ramírez, J., Conde, J., Gómez, C. *et al*. (2007). Criterios para la exploración de esmeraldas en el Cinturón Esmeraldífero Occidental (cordillera Oriental de Colombia). *XI Congreso Ccolombiano de Geología.* Bucaramanga.

Martín de Retana, J. y Moller, R. (1990). *El gran libro de la esmeralda.* Bilbao: La Gran Enciclopedia Vasca.

Maya, M., Buenaventura, J. y Salinas, R. (2004). *Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia.* Bogotá. Inédito.

Minercol. (2000). *Análisis de los mercados nacional e internacional de la esmeralda.* Bogotá: Minerales de Colombia.

Mulligan, R. (1968). Geology of Canadian Beryllium Deposits. *Economic Geology. Report 23*. Ottawa: Geological Survey of Canada, Department of Energy, Mines and Resources.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1975). *Proyecto esmeraldas.* Bogotá: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) -Ingeominas.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1976). *Prospección de esmeraldas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, Colombia. Conclusiones y recomendaciones*. Bogotá: ONU-Ingeominas.

Ottaway, T. (1991). *The geochemistry of the Muzo emerald deposit, Colombia.* Toronto: University of Toronto.

Ottaway, T., Wicks, F., Bryndzia, L., Kyser, T., Spooner, E. (1994). Formation of the Muzo hydrothermal emerald deposit in Colombia. *Nature*, *369*, 552-554.

Recio, C. y Subias, I. (2007). Two words about emerald. *Seminario Geoquímica de Isótopos Estables Aplicada al Estudio de Yacimientos Minerales,* 136-170. Bucarmanga: Universidad Industrial de Santander (UIS).

Restrepo, H. (1961). *Reconocimiento de las minas de esmeraldas de Muzo, departamento de Boyacá.* Bogotá: Servicio Geológico Nacional.

Reyes, G., Montoya, D., Terraza, R., Fuquen, J., Mayorga, M., Gaona, T. (2006). *Ingeominas. Geología del Cinturón Esmeraldífero Occidental. Planchas 169, 170, 189 y 190. Informe 2777*. Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, E. y Ulloa, C. (1994a). *Mapa geológico de la plancha 189-La Palma, escala 1:100.000.* Bogotá: Ingeominas.

Rodríguez, E. y Ulloa, C. (1994b). *Mapa geológico de la plancha 169-Puerto Boyacá, escala 1:100.000.* Bogotá: Ingeominas.

Romero, F. y Rubiano, M. (1997). Técnicas de identificación gemológica. *Geología Colombiana*, *25*, 221-239.

Romero, H., Schultz, R. y Kawashita, K. (2000). Geoquímica del rubidio-estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. *Geología Colombiana*, *22*, 189-198.

Sarmiento, L. (2002). *Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes.* Ph.D. Thesis Vrije Universiteit, Ámsterdam.

Scheibe, R. (1933). Informe sobre las esmeraldas de Nemocón. En *Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia 1917-1933,* 223-228. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá.

Schwarz, D. (2002). The chemical properties of Colombian emeralds. *Journal of Gemmology*, *23*(4), 225-233.

Simandl, G., Paradis, S. y Birkett, T. (1999). *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles.* Volume 3, Industrial Minerals and Gemstones, British Columbia Ministry of Energy and Mines, 1999-10, 109-112.

Terraza, R. y Montoya, D. (2011). Las esmeraldas de Colombia en su ámbito geológico: Excursión geológica a los cinturones esmeraldíferos de la Cordillera Oriental de Colombia en el marco del XIV Congreso Latinoamericano de Geología del 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011.

Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., Fuquen, J. (2008). *Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental. Planchas 210, 228 y 229*. Informe 2877. Bogotá: Ingeominas.

Ulloa, C. y Rodríguez, E. (1978). *Mapa geológico preliminar de la plancha 170-Vélez a escala 1:100.000.* Bogotá: Ingeominas.

Ulloa, C. y Rodríguez, E. (1991). *Memoria explicativa plancha 190-Chiquinquirá (Boyacá).* Bogotá: Ingeominas.

Ulloa, C., Camacho, R. y Escovar, R. (1975). *Mapa geológico del cuadrángulo K12. Guateque.* Bogotá: Ingeominas.

El Universal. (2013). *Colombia ya no es el primer productor de esmeraldas, lo reemplazó Zambia*. Disponible en http://www.eluniversal.com.co/economica/colombia-ya-no-es-el-primer-productor-de-esmeraldas-lo-reemplazo-zambia-131376

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2000). *Minerales estratégicos para el desarrollo de Colombia.* Bogotá: UPME-Minercol-Ingeominas.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2006). *Boletín estadístico de minas y energía 1999-2005.* Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2009). *Boletín estadístico de minas y energía 2003-2008.* Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2016). *Boletín estadístico de minas y energía 2012-2016*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) (2017). *Simco.gov.co*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPE1.aspx

Vargas, O., González, L., Prieto, G., Espinosa, A., Matamoros, A. (2001). *Interpretación geoquímica de baja densidad con geología y mineralizaciones en la plancha 5-09- Proyecto compilación y levantamiento de información geoquímica-Informe final. Informe 2656*. Bogotá: Ingeominas.

Vásquez, L. (2006). *Gammaespectrometría portátil en los cinturones esmeraldíferos colombianos Coscuez-Borbur-Pauna (occidente), Chivor-Ubalá (oriente).* Informe Interno. Bogotá: Ingeominas.

Yager, T., Menzie, W. y Olson, D. (2008). *Weight of Production of Emeralds, Rubies, Sapphires, and Tanzanite from 1995 through 2005.* U.S. Geological Survey Open file report 2008-1013 (USGS). Disponible en https://pubs.usgs.gov/of/2008/1013/ofr2008-1013.pdf