



Cromo

Humberto González

Citación: González, H. (2019). Cromo. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El cromo es el elemento más abundante del grupo de los elementos de transición. Se encuentra en una concentración de 110 ppm en la corteza terrestre y tiene una densidad de 7.19 g/cm³; su punto de fusión es 1875 °C y su punto de ebullición es 2665 °C. Sus principales características son la resistencia a la corrosión, al desgaste y al calor, condiciones aprovechadas principalmente en las industrias química, metalúrgica y refractaria.

El cromo no se encuentra libre en la naturaleza. Su mineral más importante, por abundancia y valor económico, es un óxido de cromo: la cromita (FeCr₂O₄). Las ocurrencias más importantes se encuentran en Turquía, Estados Unidos, Sudáfrica, Albania, Finlandia, Irán, Madagascar, Rusia, Rodesia Meridional, Cuba, Brasil, Japón, India, Pakistán y Filipinas. La crocoita (PbCrO₄) es también un mineral de cromo, de menor importancia, y se explota comercialmente en Rusia, Brasil, Estados Unidos y Tasmania.

En 1778 el francés Louis-Nicholas Vauquelin, tras analizar un mineral (crocoita PbCrO₄) descubierto por Peter Simón Pallas en 1770 en las minas de Beresof, en los Urales, consiguió producir un óxido (Cr₂O₃) del cual, al ser calentado con carbón vegetal, aisló trozos de un metal cuyo análisis posterior reveló un nuevo elemento metálico al que llamó cromo (de la palabra griega *chroma*, que quiere decir “color”), debido a los distintos colores que presentan los compuestos de este elemento. En 1798 Lowitz y Klaproth lo descubrieron independientemente en una muestra de una roca negra pesada, al norte de las minas de Beresof y en Tassaert, así como en un pequeño depósito en la región del Var, al sureste de Francia. Este mineral se determinó como el rubí sintético del cromo-hierro, ahora conocido como cromita (FeOCr₂O₃).

Dichos depósitos aumentaron fuertemente las fuentes de cromo, en ese entonces usado únicamente en la industria de la pintura. En 1827 Isaac Tyson identificó depósitos en la frontera de Maryland-Pensilvania, en Estados Unidos, que se convirtieron en los principales abastecedores mundiales.

A partir de 1860 se explotaron los depósitos de Turquía, mientras que la explotación minera del mineral de cromo comenzó en India y África meridional alrededor de 1906.

Los pigmentos en pintura fueron el uso principal del cromo hasta finales del siglo XIX, cuando se comenzó a usar como aditivo en aceros y como material refractario. A principios del siglo XX se obtuvo el metal mediante aluminotermia; a partir de entonces comenzó el mayor uso de la cromita en la aleación ferrocromo y el cromo como ingrediente principal de los aceros inoxidables (Álvarez, 1987).

Existen dos tipos de depósitos: estratiformes y podiformes u ofiolíticos. En Colombia las manifestaciones de cromita son de tipo podiforme, asociadas a cinturones ofiolíticos. El principal depósito, asociado a la Dunita de Medellín, ya fue explotado; las demás manifestaciones no presentan condiciones de infraestructura favorables para su aprovechamiento económico y tienen pocas reservas de mineral (a pesar de demostrar concentraciones óptimas para ser usada en la industria refractaria). Dada su magnitud, en Colombia no se reporta oficialmente producción de cromo.

1. Usos

El cromo raramente se emplea como metal puro, ya que en frío es duro y quebradizo, y en caliente se oxida; por tanto, se utiliza como parte de muchas aleaciones. Sus principales características son la resistencia a la corrosión, al desgaste y al calor, así como su color. Estas propiedades lo convierten en un material indispensable y versátil en la industria moderna.

La fuente comercial primaria está bajo la forma del mineral cromita; sus usos principales están enfocados hacia las industrias de la metalurgia, refractarias y químicas; el porcentaje de su uso para el 2016 se muestra en la figura 1. La mayor parte de la cromita producida entra en los aceros; el resto se utiliza para aleaciones de acero

especiales, superaleaciones de metal cromo, productos químicos de cromo y productos refractarios basados en cromo. Estos porcentajes no han variado mucho en la

última década, si se tiene en cuenta que en el 2005 eran del 93.4 % para grado metalúrgico; del 3.1 % para grado químico y del 3.5 %, para grado refractario y de la fundición.

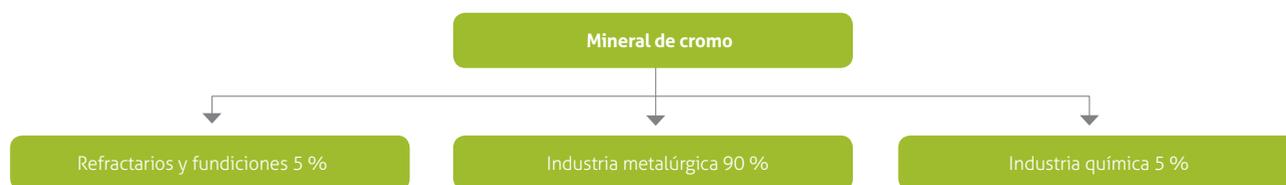


Figura 1. Usos del mineral de cromo

Fuente: ICDA (2017)

Desde el punto de vista de la composición y el uso existen tres divisiones generales para los minerales de cromo (Thayer, 1973; Mikami, 1983, citados en Álvarez, 1987):

- Cromita alta en cromo (grado metalúrgico). Contiene un 46 % o más de Cr_2O_3 y una relación de Cr:Fe de 2:1 o más. Una composición estándar tiene un 48 % Cr_2O_3 y una razón de Cr:Fe de 3:1.
- Cromita alta en hierro (grado químico). Contiene del 40 al 46 % (promedio ≥ 44 %) de Cr_2O_3 . Una relación de Cr:Fe menor (generalmente 1.5) Cr:Si de 2:1 o más. Una composición estándar tiene un 48 % Cr_2O_3 y una razón de Cr:Fe de 3:1.
- Cromita alta en aluminio (grado refractario). Contiene del 30 al 40 % de Cr_2O_3 , del 25 al 32 % de Al_2O_3 y una relación de Cr:Fe que varía de 2.0-2.5:1. El hierro total como FeO es menor al 15 %.

1.1. Aplicaciones metalúrgicas (cromita alta en cromo)

En metalurgia el cromo imprime resistencia, dureza y brillo como componente de aleaciones, las cuales son poco sensibles a las temperaturas elevadas y a la acción química como la corrosión (Papp, 2007).

La principal aleación es el ferrocromo (hierro y cromo), que proporciona alta resistencia a la corrosión y mejora la dureza. Se produce por reducción pirometalúrgica de la cromita con carbón o sílice, en hornos de arco voltaico a altas temperaturas.

El acero inoxidable contiene entre el 8 y el 12 % de cromo, que es el principal responsable de que sea inoxidable. Actualmente es utilizado en materiales de construcción, aplicaciones eléctricas, calentadores eléctricos de agua, utensilios de cocina, para moldear y en tanques de agua (Papp, 2007). El consumo de aceros inoxidables está

aumentando con un índice de crecimiento anual del 5 %, y ha encontrado nuevos usos en el sector de los productos alimenticios y de las bebidas, la arquitectura, la explotación minera y la industria del automóvil.

Otra aplicación está en las superaleaciones, usadas en las industrias aeroespacial, automotora y eléctrica, en control de la contaminación, generación de energía y productos químicos y petroquímicos (Papp, 2007).

Molibdeno, cromo y níquel se utilizan en aleaciones para turbinas de motor de automóviles y jets. Otras aleaciones importantes del cromo son las de hierro y níquel (como resistencia en los aparatos de calefacción eléctrica), cobalto, aluminio, titanio y aleaciones no ferrosas (ICDA, 2017).

El cromo puede reciclarse con facilidad, pues tanto en el acero inoxidable como en su forma metálica no plantean ninguna amenaza al ambiente (ICDA, 2017).

1.2. Aplicaciones químicas (cromita alta en hierro)

Los productos químicos del cromo ofrecen dos características distintivas: estabilidad y permanencia del color; por tanto, es utilizado principalmente como catalizador y pigmento. Los cromatos y dicromatos ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) son inhibidores de la corrosión. Se usan para la preparación de colorantes, en fungicidas y esmaltes cerámicos.

El cromato de plomo (PbCrO_4), conocido como “amarillo de cromo”, se usa como colorante. Al igual que el óxido de cromo (Cr_2O_3), conocido como “verde de cromo”, se emplea en la coloración de vidrios y porcelanas, así como en pinturas esmaltadas.

El dióxido de cromo (FeCr_2O_3), por su parte, es un material ferromagnético utilizado para el recubrimiento de las cintas de casete de “cromo”. El trióxido de cromo (CrO_3) se vende industrialmente como “ácido crómico”. El dicro-

mato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) es un oxidante utilizado para limpiar el material de vidrio en los laboratorios; también se utiliza como agente para fijar tintas en tela.

Por último, el bromuro de cromo (CrB) se emplea como conductor eléctrico de alta temperatura, y el sulfato de cromo ($Cr_2(SO_4)_3$) se utiliza como pigmento verde en pinturas, cerámica, barnices y tintas.

1.3. Aplicaciones refractarias (cromita alta en aluminio)

El punto de fusión elevado de la cromita ha sido aprovechado desde hace más de cien años en la industria de los refractarios. Se utiliza en hornos rotatorios de cemento Portland, ladrillos refractarios, arenas de fundición, cristalería, hornos para gasificación de carbón y calderas (Vélez, 2000).

1.4. Otras aplicaciones

El cromo disminuye las propiedades magnéticas, lo cual tiene importancia para la industria de la relojería. También aumenta la sonoridad (por ejemplo en trompetas, campanas, etc.). Se usa también para dar un color verde a las esmeraldas y un color rojo a los rubíes.

2. Ambiente geológico

El cromo es un elemento litófilo que se presenta íntimamente asociado al níquel y al magnesio en las rocas máficas y ultramáficas, en depósitos estratiformes y podiformes. A continuación se describen las principales características físicas y químicas del cromo, los tipos de depósitos en los que se encuentra y los métodos de prospección, explotación y proceso de beneficio, para su aplicación en las diferentes industrias.

2.1. Características

Las rocas fuente contienen un promedio que fluctúa de 1000 a 3000 ppm de cromo, concentraciones altas comparadas con 2000 ppm para peridotita, 200 ppm aproximadamente para gabro y 5 ppm para granito (smenet.org; Jensen y Bateman, 1981, citados en Álvarez, 1987). La cromita es el único mineral primario de cromo; no existe ningún mineral secundario de este elemento. En muchas de estas rocas se presentan trazas hasta del 1 % de Ti, V, Mn y Ni (Mikami, 1983, citado en Álvarez, 1987).

La cromita ($FeCr_2O_4$) es un óxido de cromo que corresponde a una variedad de la serie isomórfica del grupo de

la espinela; contiene, teóricamente, un 67.9 % (en peso) de Cr_2O_3 y varía en su composición según el contenido de Fe, Mg y Al. Los óxidos pueden variar entre los siguientes valores (tabla 1):

Tabla 1. Variación composicional de la cromita

Composición	Peso (%)
Fe	24.95
O	28.59
Cr	46.46

Fuente: Webmineral.com (s. f.)

En la figura 2 la composición de la cromita se representa con un prisma de seis extremos teóricos. El volumen señalado dentro del prisma corresponde a las cromitas naturales.

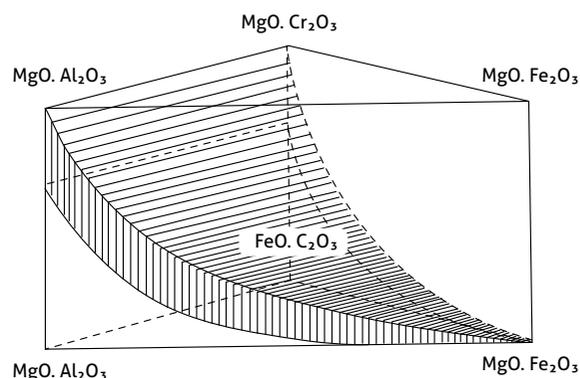


Figura 2. Prisma con la composición molecular de la cromita en términos de seis componentes extremos

Fuente: Mikami (1983, citado en Álvarez, 1987)

La composición depende de la profundidad a la que se forma en la columna de percolación. Los altos contenidos de Al se encuentran en la parte superior de los canales de percolación (a alta fugacidad de oxígeno) y los altos contenidos de Cr en la parte inferior (a baja fugacidad de oxígeno). Las cromitas con altos contenidos de Al se han formado a partir de un magma de afinidad de basaltos de "back arc", mientras que las cromitas con altos contenidos de Cr se forman a partir de un magma análogo a una boninita; por ejemplo, cromatinas podiformes en la Faja Ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba) (Proenza *et al.*, 1988).

Las cromitas de interés económico tienen un contenido de Cr_2O_3 que varía del 25 al 65 %, y están libres de ganga; sin embargo, esta se encuentra siempre presente y consiste principalmente en silicatos. Físicamente, son de color negro grisáceo oscuro, con un lustre que puede ser vítreo brillante, resinoso u opaco. Su dureza en la escala

de Mohs varía de 5.5 a 6.5, y la gravedad específica de 4.1 a 4.7 g/cm³.

La mena ocurre generalmente como agregados masivos con granos de cromita de 0.05 a 30 mm, más frecuentemente de 1 a 5 mm. Cuando se incrementa el material de ganga la mena grada de masiva a diseminada. Los granos varían de euhedrales a anhedrales, redondeados o irregulares.

2.2. Tipos de depósitos

Los depósitos primarios de cromita ocurren en dos grandes grupos: estratiformes y podiformes, descritos a continuación:

2.2.1. Depósitos estratiformes

Forman capas en las zonas inferiores de los complejos ultramáficos estratificados. Se originan en una zona cratótica estable perturbada por una pluma de manto, en la que se inicia un magmatismo bimodal como producto de una cristalización fraccionada (estadio embrionario o *rift* continental) (Riba, 1997).

Estos depósitos se caracterizan por su gran extensión —frecuentemente de muchos kilómetros, gran tonelaje (centenas a miles de millones de toneladas)—, uniformidad lateral y posición estratigráfica consistente dentro de la secuencia litológica, características que facilitan la prospección minera. Poseen además estratificación rítmica y críptica, y se encuentran asociados principalmente a acumulaciones de gabro (Great Dyke, Zimbabue); gabro y anortosita, anortosita rica en minerales del grupo del platino (MGP), piroxenitas, piroxenitas y dunita (Bushveld, Sudáfrica), y piroxenitas con diques de diabasa (Stillwater, Estados Unidos).

Las capas son tabulares y paralelas a la estratificación magmática, y presentan textura cúmulus (asentamiento gravitatorio de cristales, como efecto de la precipitación de productos cristalinos magmáticos que ocurren en el piso de la cámara magmática); además se presentan otras fases metálicas como minerales accesorios, las más comunes son: \pm ilmenita \pm magnetita \pm pirrotita \pm pentlandita \pm calcopirita \pm MGP. En posición intersticial con respecto a los granos de cromita hay principalmente olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y plagioclasa cálcica (Duke, 1988, citado en Álvarez, 1987).

Los complejos estratificados con depósitos de cromita se han formado a lo largo de todo el tiempo geológico, pero son más importantes en el Precámbrico (Jackson y Thayer, 1973, citados en Álvarez, 1987). Su génesis fue probablemente por sedimentación magmática, con la influencia, en

mayor o menor grado, de corrientes de convección (Waier y Orown, 1967, citados en Álvarez, 1987). Como ejemplos se tienen el Complejo de Bushveld (Sudáfrica); Gran Dique y Complejo Hartley, Shurugw antes Seluke (Zimbabue); Stillwater (Estados Unidos); Campo Formoso (Brasil); Orissa (India), Rum Layered, Scattush Hebrides (Reino Unido) —que presentan abundantes MGP, asociados a cromitas—; Kuirajong (Australia) —en el que se tienen cromitas en komatiitas—, y Kemi y Vammala Ni-Belt (Finlandia). A continuación se describen algunas de las características generales de unos de los ejemplos mundiales más importantes de este tipo de depósitos (Garcés, 1995).

Gran Dique (Zimbabue). Corresponde a un intrusivo en un complejo granítico del Arcaico, que ocurrió hace por lo menos unos 2530 Ma. El dique está constituido, de base a techo, por dunitas serpentinizadas-harzburgitas, piroxenitas, gabros y noritas. Las capas de cromitas se encuentran en la parte inferior del intrusivo, entre dunitas y harzburgita. El yacimiento contiene hasta 11 capas de cromitas con espesores entre 16 y 72 cm, con separaciones entre sí de 6 m aproximadamente. La cromita contiene cerca del 50 % de Cr₂O₃ y hasta el 11 % de Fe₂O₃. Sus reservas se estiman entre 300 y 500 millones de toneladas.

2.2.2. Depósitos podiformes

Las cromitas podiformes o depósitos tipo alpino son principalmente lenticulares o *pods*, irregulares, en forma de lápiz o tabulares (Thayer, 1969, citado en Álvarez, 1987); se originan en el estadio de colisión (o estadio relicto) entre una margen continental y una zona de subducción, originando exhumación de depósitos de cromita, formados en la etapas anteriores de apertura de la cuenca oceánica.

En general, son de dimensiones pequeñas y varían de unas pocas toneladas a algunos millones de toneladas, con alto contenido de cromo o alto contenido de aluminio. Las masas no son continuas y se encuentran con frecuencia al azar en harzburgitas o dunitas que comúnmente están serpentinizadas, pertenecientes a complejos ofiolíticos. La mena de cromita va de masiva a diseminada, a veces con textura orbicular, nodular, néisica, y cúmulus que presentan lineación o foliación, que pueden también formar agregados masivos.

Los minerales ofiolíticos son cromita y olivino, otros minerales comunes en la matriz son: clinopiroxeno, ortopiroxeno, plagioclasa y anfíbol. Además, los granos de cromita pueden contener inclusiones de los siguientes minerales: olivino, anfíbol (pargasita), flogopita, clinopiroxeno, ortopiroxeno, albita, nefelina, sulfuros de Fe-Cu-Ni (pentlandita, heazlewoodita, calcopirita), fases portadoras de MGP

(laurita, sperryllita y minerales en aleaciones de Fe-Pt y de Ru-Ir). El emplazamiento de las series ofiolíticas tiene como resultado el desarrollo de texturas de deformación frágil, como las cataclásticas y texturas de *pull-apart* (Duke, 1988).

Como ejemplos de este tipo de depósitos en el mundo se tienen: Rulemán (Turquía); Kalimash-Kukes (Albania); Ofiolita de Tiébaghi y Massif du Sud (Nueva Caledonia); Acoje y Masinloc-Coto (Filipinas); Batamshinsk, Stepninsk y Tagashaisai (Rusia); Xeraivado y Skoumtsá (Grecia); Ofiolita Semail (Omán), y Luobusa, Donqiao, Sartohay, Yushi, Solun, Wudu y Hegenshan (China) (Ash, 1996). A continuación se describen las características generales de uno de los ejemplos mundiales más importantes de este tipo de depósitos (Garcés, 1995).

Acoje y Masinloc-Coto (Filipinas). Estos yacimientos se encuentran en el complejo ofiolítico Zambales de Luzón Occidental, que se considera levantado, en el Eoceno, hasta el nivel de la serie de rocas volcánicas que conforman el arco de islas. Las rocas ultramáficas comprenden dunitas cromíticas, harzburgitas (gabros) y piroxenitas serpentinizadas. Las rocas ígneas estratificadas incluyen anortosita, gabro, troctolita y norita. Todas las rocas muestran texturas cataclásticas de recristalización, formadas a temperaturas próximas al estado sólido. Diques de basaltos, diabasas y anfibolitas cortan las rocas ígneas y también las ultramáficas.

En la mina Acoje existen unos 27 cuerpos de cromita distribuidos en una faja de 1 km de largo y 350 m de profundidad. Las reservas se estiman en 2.5 millones de toneladas de cromita metalúrgica, con promedios del 35 % de Cr_2O_3 y del 0.8 % de Ni.

En la mina Masinloc la cromita se encuentra en forma de un gran lente (Coto) y doce lentes más pequeños, dentro de una franja de 2.5 km de largo. Contiene, en promedio, un 36 % de Cr_2O_3 y un 30 % de Al_2O_3 .

2.2.3. Depósitos de placer

Estos depósitos se forman como resultado de la meteorización físico-mecánica de los minerales pesados y de las rocas en los que estos se encuentran; es el caso de la cromita en rocas ultramáficas. Los principales depósitos se encuentran en Indonesia, Papúa Nueva Guinea, Filipinas, Estados Unidos, Vietnam y Zimbabue (Papp, 2007).

2.3. Métodos de prospección

Los métodos de prospección para la cromita incluyen cuatro 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 y de anomalías geoquímicas, ejecutando la inspección preliminar de campo, así como otros trabajos regionales que pueden ser estudios aerogeofísicos, en especial métodos magnéticos y gravimétricos.

La *prospección* se realiza con el fin de identificar el depósito para llevar a cabo la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreos de roca y geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques), y perforaciones aisladas para medir el comportamiento de la mineralización a profundidad. Se ejecutan trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos y gravimétricos, que permiten obtener de manera preliminar las dimensiones y la morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Según el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calculan los recursos o reservas, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

La *exploración general* permite la delimitación más confiable de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada; estudios estratigráficos; muestreos superficiales de roca; trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos magnéticos, gravimétricos y geoelectrónicos más detallados, así como también la realización de apiques y perforaciones, los cuales conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delimitan mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. También pueden llevarse a cabo estudios metalúrgicos preliminares y de prefactibilidad económica que permitan la toma de decisiones para la continuación hacia la etapa siguiente.

Por su parte, la *exploración detallada* permite la definición tridimensional del depósito mediante el muestreo de rocas, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes, tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y el beneficio mineral.

Para llevar a cabo la prospección de cromita se emplean métodos geoquímicos, geofísicos (en los que se buscan anomalías de gravedad) y cartografía geológica convencional. Actualmente se ha implementado el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

La prospección por métodos geoquímicos es una tarea difícil debido al alto contenido de cromita accesoria en

todas las peridotitas (Álvarez, 1980). La cromita, como mineral resistente a la meteorización, forma en la superficie prominencias o se conserva como granos o pequeños fragmentos en el suelo residual, como resultado de la meteorización mecánica, cuando las rocas ultramáficas han sido sometidas a procesos de intemperismo. Este hecho puede utilizarse como guía de ocurrencias de cromita, pero depende de la presencia y abundancia de concentración de granos y fragmentos.

Asimismo, a causa de la acción erosiva de los agentes degradantes del relieve, la cromita es transportada por las corrientes como material sólido y depositada conjuntamente con otros minerales pesados. De esta manera la anomalía geoquímica es definida por granos detríticos o fragmentos, ya sea por observación visual directa en los cauces de las corrientes o utilizando la concentración del material aluvial (Álvarez, 1980). Para el área de Santa Elena-Medellín Álvarez y Muñoz (1981) concluyeron que dicho método es una herramienta útil, y mediante ella encontraron áreas anómalas para este mineral. (Thayer, 1969, citado en Álvarez, 1987) considera inaplicables los métodos geoquímicos y asigna una gran importancia a la cartografía geológica. Además, dice que la prospección en depósitos podiformes ha sido exitosa. Aunque la primera afirmación es discutible, la segunda parece ser muy importante en algunos casos (Álvarez, 1987).

En cuanto a los métodos geofísicos, la gravimetría ha sido de gran ayuda en algunos casos (Mikami, 1983). En Cuba y Yugoslavia fue utilizada en condiciones ideales de bajo relieve (Thayer, 1969, citado en Álvarez, 1987). En Santa Elena-Medellín, Antioquia, medidas gravimétricas dieron un buen resultado en la delimitación de ocurrencias de cromita en una zona de topografía ondulada (Geominas, 1973, 1975, citado en Álvarez, 1987). La magnetometría ha sido, en general, poco utilizada. Perforaciones, túneles o trincheras cerca de cuerpos conocidos son los métodos más corrientes para descubrir nuevos cuerpos (Mikami, 1983).

Es importante destacar que la prospección y la estimación de recursos en los complejos estratiformes están sujetas a la cartografía geológica convencional, porque existe una base genética para explicar y predecir la distribución de la cromita. Este tipo de depósitos, una vez encontrados, son comparativamente fáciles de explorar y desarrollar. Por ejemplo, en el Complejo Bushveld en Sudáfrica, donde la cromita se presenta en capas que tienen decenas de kilómetros de longitud y se extienden considerablemente sin sufrir perturbaciones mayores a profundidad. Sin embargo, el hallazgo de nuevas ocurrencias de mena no aflorante,

como prolongaciones del cuerpo principal, requiere la experiencia y el conocimiento geológico que se tenga sobre el cuerpo. Las capas podrían acuñarse o ser más numerosas en una región con respecto a otra, y aunque el conocimiento geológico aumentaría las posibilidades de éxitos en hallarlas, se requerirán perforaciones, trincheras y túneles antes de tener certeza de su existencia y localización (Heiligman y Mikami, 1960, citados en Álvarez, 1987).

Los depósitos podiformes, sin embargo, presentan características diferentes de los estratiformes, en cuanto a tamaño, forma, arreglo espacial y distribución (Mikami, 1983). Esta última puede ser errática, al azar o impredecible, si se cumple la hipótesis petrogenética de Thayer 1969, citado en Álvarez, 1987, según la cual los depósitos podiformes son remanentes dislocados de depósitos estratiformes originales. No obstante, algunos depósitos parecen estar concentrados en peridotitas cerca al contacto con gabros. Mediante el estudio geológico en detalle en Cuba y Filipinas se encontró que los cuerpos de mena van de tabulares a lenticulares, paralelos al bandeamiento de la roca encajante y situados a unos cientos de metros del contacto peridotito-gabro (Flint *et al.*, 1948; Bryner, 1969, citados en Álvarez, 1987). Por tanto, la relación estructural y los rasgos texturales de los depósitos de cromita, con respecto a los de la roca huésped, sirven de indicio en algunas partes para la localización de otros cuerpos. En resumen, los métodos estratigráficos tienen una mayor aplicación en depósitos estratiformes durante las fases de prospección y exploración.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

Una variedad amplia de técnicas se aplica en la explotación de las cromitas, tanto a cielo abierto como subterránea. En los métodos a cielo abierto el tamaño, la forma y la posición de los cuerpos hace algunas veces indispensable este tipo de explotación. Por ejemplo, en el Complejo Bushveld (Sudáfrica) donde las capas explotables buzan 10° a 20° y su espesor es aproximadamente de 1.50 m, el mineral se ha extraído por varias centenas de metros en el sentido del rumbo. En este caso, las limitaciones en la explotación son únicamente de índole económica (Mikami, 1983, citado en Álvarez, 1987).

La mayor parte de los depósitos podiformes se explotan por medio de sistemas subterráneos, como los de Guleman Soridag en Turquía y Camagüey en Cuba. Si los cuerpos son relativamente grandes y están cerca de la superficie, de manera que el descapote sea económicamente factible,

el método de explotación a cielo abierto se podrá usar, como es el caso del depósito Coto en Luzón (Filipinas). En Colombia la explotación del cuerpo de Santa Elena-Medellín fue una combinación entre cielo abierto y subterránea, debido a que la mineralización era en forma de tachuela.

La producción final en sus diferentes usos químicos, metalúrgicos o refractarios incluye métodos neumáticos e hidráulicos en los procesos de clasificación, molienda, cocción y fundición en horno eléctrico (Papp, 2007). Aunque en muchas partes del mundo la cromita no es beneficiada para aumentar su concentración, cuando este proceso se efectúa los métodos utilizados son de carácter físico e incluyen flotación, mesas vibratorias, espirales, hidrociclones, separaciones electromagnéticas y electrostáticas (Mikami, 1983, citado en Álvarez, 1987).

Existen varios métodos químicos que enriquecen la cromita en Cr_2O_3 , reduciendo el hierro y aumentando la relación Cr:Fe, lo cual ha sido importante para el empleo metalúrgico. En las aleaciones se prefiere que el cromo sea un metal libre de carbono, el cual se obtiene por el procedimiento aluminotérmico de Goldschmidt, reemplazando los procedimientos químicos, electroquímicos y electrotérmicos que aún se usan en la obtención de ferrocromo.

En Colombia la cromita se ha beneficiado mediante separación por medios densos (tetrabromoetano y bromoformo), y por separación magnética en separador isodinámico Frantz.

2.5. Recursos, reservas y comercio

El Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey [USGS]) afirma que los recursos mundiales de cromita superan 12000 millones de toneladas, suficientes para satisfacer la demanda mundial durante muchos siglos. Los recursos están concentrados en el sur del continente africano (Sudáfrica y Zimbabue) y en Kazajistán (figura 3).

Sudáfrica y Zimbabue tienen las mayores reservas y recursos de cromita del mundo; Sudáfrica tiene reservas de aproximadamente 200 millones de toneladas y un recurso adicional estimado de 500 millones de toneladas, y Zimbabue tiene reservas de alrededor de 140 millones de toneladas, con otros 1000 millones de toneladas en recursos. Este último país es el único que explota depósitos estratiformes y podiformes. Los depósitos estratiformes ocurren en el Gran Dique, de aproximadamente 550 km de largo y 11 km de ancho, mientras que los depósitos podiformes se producen en las zonas Selukwe y Belingwe.

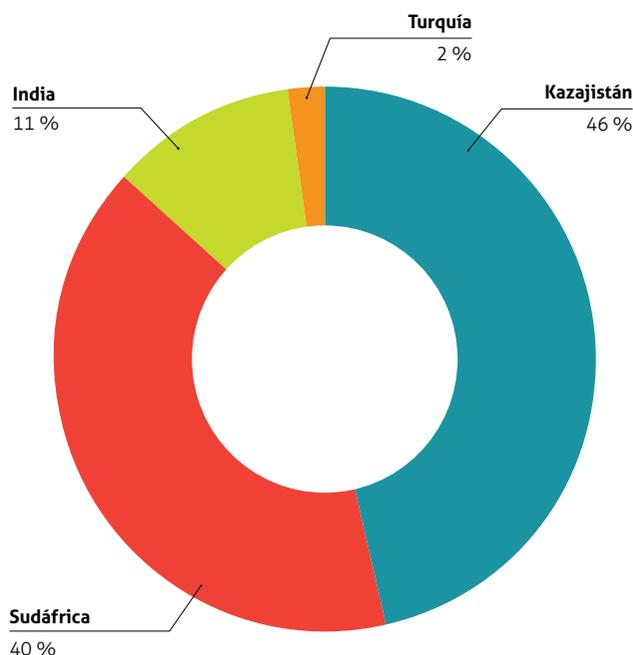


Figura 3. Porcentaje de participación de reservas de cromo por países, 2017

Fuente: USGS (2017)

Kazajistán tiene depósitos podiformes en la región montañosa de los Urales del sur, con reservas de 230 millones de toneladas y recursos adicionales de 320 millones de toneladas. Los minerales varían en gran medida en el contenido de cromo y en las proporciones de Cr: Fe.

En India las reservas se estiman en 54 millones de toneladas con un recurso adicional de 67 millones de toneladas; allí se presentan depósitos podiformes en la costa este del estado de Orissa.

Finlandia tiene depósitos podiformes cerca de Kemi, en el norte; aunque el contenido de Cr_2O_3 es muy bajo, el mineral ha sido extraído con éxito, concentrado y fundido a ferrocromo, para convertirlo luego en acero inoxidable en el sitio. Poseen 41 millones de toneladas de reservas y recursos de 120 millones de toneladas.

En la tabla 2 se puede observar la evolución de las reservas a nivel mundial a lo largo de los últimos veinte años según información del USGS; en términos generales, estas han incrementado levemente: para el 2003 el USGS realizó corrección sobre las reservas de Sudáfrica basado en nuevos estudios, por esta razón se observa la disminución drástica en el periodo 2001-2006.

Tabla 2. Evolución de las reservas de cromo por país

País	Reservas (toneladas)				
	1996	2001	2006	2011	2016
India	27000	26000	25000	54000	54000
Kazajistán	320000	320000	290000	220000	230000
Sudáfrica	3100000	3000000	160000	200000	200000
Turquía	8000	8000			12000
Otros	245000	250000			
Total	3700000	3604000	475000	474000	496000

Fuente: USGS (2017)

En Brasil la producción se concentra en Bahía y Minas Gerais; aunque se han identificado depósitos de cromita en otros estados, se trata principalmente de depósitos estratiformes con reservas de 14 millones de toneladas y recursos de 17 millones de toneladas.

Otros países con depósitos de cromita más pequeños incluyen Omán, Irán, Turquía y Albania: el total de las reservas y recursos de estos y otros países son 24 millones de toneladas y 538 millones de toneladas, respectivamente.

En cuanto a la producción mundial de cromo, los principales países productores se muestran en la figura 4. Los minerales de cromo son distribuidos y comercializados como cromita y ferrocromo, siendo mayor la producción de cromita, la cual se muestra, por países, en la figura 5. En el mundo, para el 2016, la producción de cromita era de casi 31 millones de toneladas; el mayor productor de cromita era Sudáfrica (46 %), seguido por Kazajistán (18 %) e India (11 %).

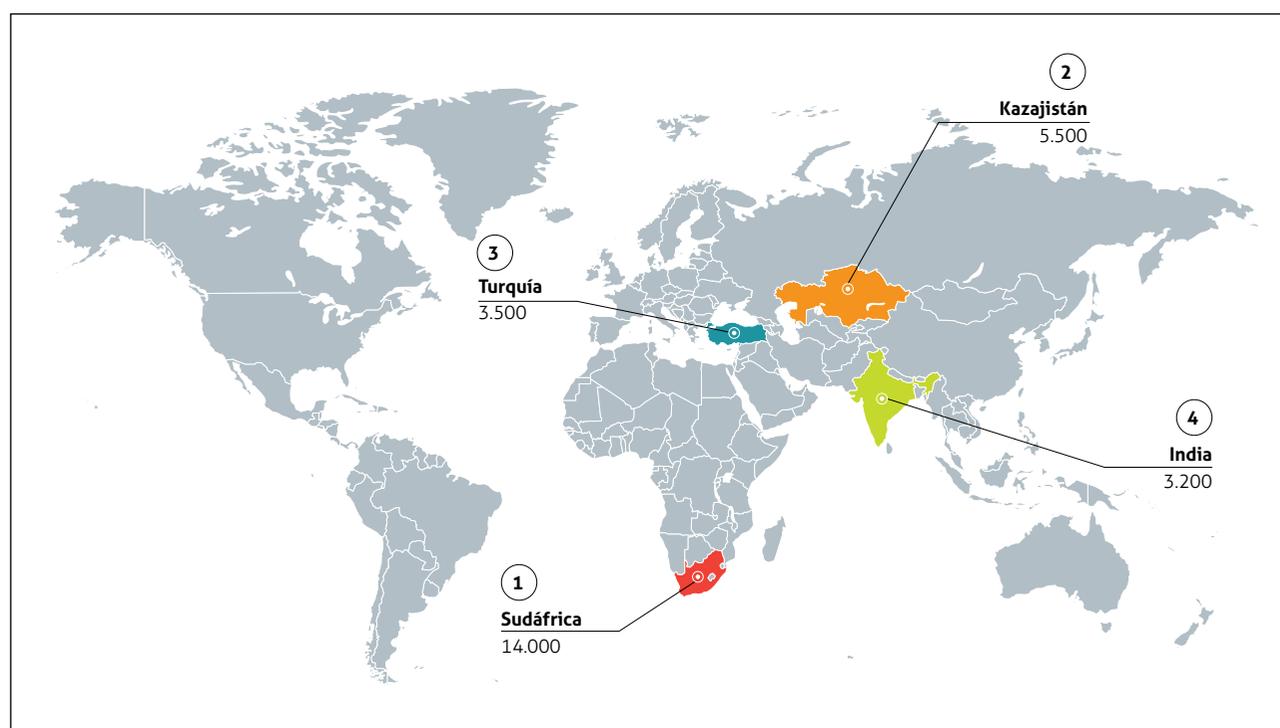


Figura 4. Principales países productores de cromo, 2017 (estimados)

Fuente: USGS (2017)

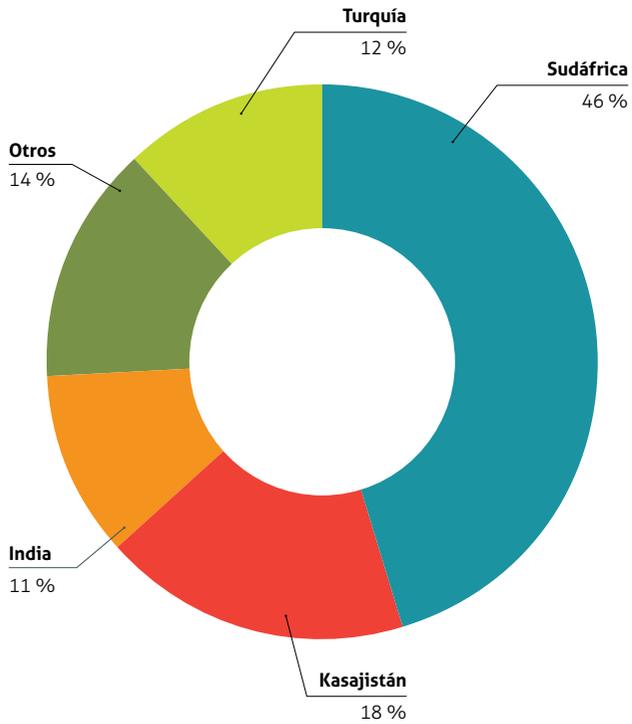


Figura 5. Participación de los principales países en la producción mundial de cromita, 2017

Fuente: USGS (2017)

En la tabla 3 se puede observar la evolución de la producción a nivel mundial a lo largo de los últimos veinte años, según información del USGS. Se observa que el volumen de producción se ha triplicado, pasando de 12000 a 30400 t/año, siendo notable la evolución de Sudáfrica y Turquía.

Tabla 3. Evolución de la producción de cromo por país

País	Producción (toneladas)				
	1996	2001	2006	2011	2016
India	1230	1500	3300	3800	3200
Kazajistán	2400	2300	3600	3900	5500
Sudáfrica	5100	5400	8000	11000	14000
Turquía	800	500			3500
Otros	2470	2300	5000	5300	4200
Total	12000	12000	19900	24000	30400

Fuente: USGS (2017)

En los últimos años se ha invertido la tendencia al alza que mostraba el precio del cromo desde el 2000 hasta el 2011, cuando alcanzó su máximo valor de USD\$13/kg. Desde ese año, el precio del cromo comenzó a declinar, registrando una reducción constante para los últimos cinco años (figura 6).

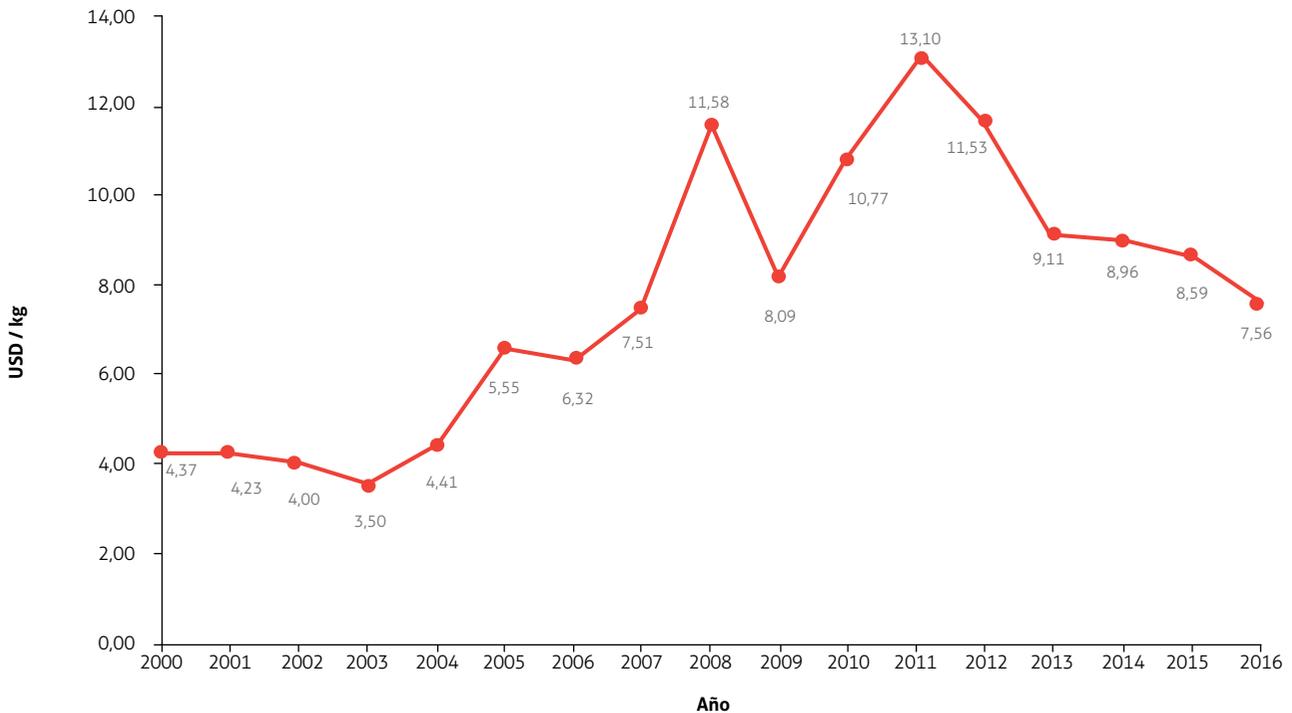


Figura 6. Comportamiento del precio promedio de cromo 99 %, 2000-2016

Fuente: MetalBulletin (2017)

2.6. Perspectivas

El consumo de cromo en el mundo está estrechamente relacionado con la producción de acero inoxidable, que es su uso fundamental, pues del total de mineral de cromo que se produce el 90 % es utilizado por la industria metalúrgica, y de este el 95 % se utiliza para fabricar acero inoxidable (Banerjee, 2006). La tendencia de proveer el cromo en forma de ferrocromo por parte de los países productores fue interrumpida cuando China se convirtió en un consumidor importante de cromita.

La capacidad de producción está actualmente en equilibrio con el consumo medio. Para mejorar la disponibilidad del mineral y para estabilizar el precio los productores del ferrocromo invierten en minas que producen cromita. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la producción de ferromnésico es intensiva en energía eléctrica y, por tanto, limitaciones en el suministro de electricidad pueden generar producciones limitadas en el futuro.

3. Cromo en Colombia

Actualmente en Colombia no hay reportes oficiales de producción de cromo. En la región de Santa Elena-Medellín, departamento de Antioquia, se explotó un depósito podiforme de cromitas de grado refractario, asociado a la Dunita de Medellín.

3.1. Geología regional

En Colombia la cromita se puede encontrar asociada a depósitos podiformes en ultramáficas de complejos ofiolíticos. En la figura 7 se esquematiza la ocurrencia de rocas ultramáficas mesozoicas asociadas a ofiolitas en el sistema de fallas Cauca-Romeral.

Según Álvarez (1983, 1985) en Colombia existen tres fajas de rocas máficas y ultramáficas, entre las que se encuentran el Cinturón Ofiolítico Romeral (COR), el Cinturón Ultramáfico del Atrato (CUA) y el Cinturón Ofiolítico del Caribe (COC). Los cuerpos que los constituyen son numerosos en el COR y el CUA, pero solo en dos de ellos, Dunitas de Medellín y Serpentinitas de Parashi, La Guajira, se conocen ocurrencias de cromita, sobre la Provincia Metalogénica Andina Central y la Provincia Metalogénica Andina Oriental, específicamente en la Sierra Nevada de Santa Marta, respectivamente (figura 8). Únicamente la ocurrencia en las Dunitas de Medellín es comercialmente económica.



Figura 7. Sistema de fallas Cauca-Romeral con ofiolitas asociadas

Fuente: Ortiz (2006)



Figura 8. Provincias Litosféricas de Colombia

Fuente: Ingeominas (2006)

3.2. Geología local

Los cuerpos estudiados en Colombia son podiformes, de forma lenticular y bolsas irregulares; se encuentran dispersos y son de pequeñas dimensiones. El estudio de estos depósitos se ha hecho por geofísica (magnetometría y gravimetría), además de exploraciones superficiales.

En el departamento de Antioquia, en la zona central en la región de Santa Elena-Medellín, se explotó un depósito podiforme de grado refractario asociado al cuerpo dunítico de Medellín, conocido como Cromitas de Medellín (Jaramillo *et al.*, 1974, citados en Álvarez, 1982). Para este cuerpo se determinaron contenidos anómalos de minerales del grupo del platino (MGP. Se estudió en la misma zona (vereda Cerezales), en el municipio de San Pedro de los Milagros, departamento de Antioquia, un cuerpo de cromita para el que se determinó, en laboratorio, mediante separación por medios densos y magnéticos, que estas son las indicadas para ser utilizadas como materia prima refractaria; sin embargo, a pesar de que existen otras manifestaciones semejantes, son de escaso valor económico, dadas sus dimensiones (González, 2001).

3.3. Situación actual de la minería

Los recursos relacionados con el cromo no se han divulgado; no se conocen en el país depósitos exclusivos de este mineral. Sin embargo, a la fecha, en los registros de la Agencia Nacional de Minería (ANM, 2017), existen cinco (5) títulos vigentes, con un área de 60612.36 ha, dos en etapa de explotación, dos en etapa de exploración y uno con par en la Gobernación de Antioquia, con cobalto entre los minerales a concesionar, las cuales se encuentran localizados en los departamentos de Córdoba, Santander, Cauca, Antioquia y Tolima. Con respecto a solicitudes mineras se reportan 29 vigentes, con un área de 30903.21 ha, en los departamentos de Antioquia, Santander, Huila, Valle, Cauca, Tolima, Chocó, Boyacá y Nariño (tablas 4 y 5) (figuras 9 y 10).

Tabla 4. Solicitudes de títulos mineros

Solicitudes	
Código Solicitud	Estado
JG1-11423	Solicitud vigente en curso
JK4-16096X	Solicitud vigente en curso
OG2-09311	Solicitud vigente en curso
KHP-14161	Solicitud archivada-Liberación de área
QCH-09271	Solicitud vigente en curso
JK4-16092X	Solicitud vigente en curso
GB3-091	Solicitud vigente en curso
LDE-09371	Solicitud vigente en curso
GLG-094	Solicitud vigente en curso
OGN-09581	Solicitud vigente en curso
QDA-08221	Solicitud vigente en curso
OHU-10091	Solicitud vigente en curso
OHU-09341	Solicitud vigente en curso
PJT-14081	Solicitud vigente en curso
OKM-11071	Solicitud vigente en curso
ICQ-080039X	Solicitud vigente en curso
JK4-16091	Solicitud vigente en curso
PHL-08371	Solicitud vigente en curso
OLD-11171	Solicitud vigente en curso
OLD-12092	Solicitud vigente en curso
PA3-09061	Solicitud vigente en curso
PA3-09421	Solicitud vigente en curso
OKM-09461	Solicitud vigente en curso
OKM-10272X	Solicitud vigente en curso
OKM-10273X	Solicitud vigente en curso
HIT-114910X	Solicitud archivada-Liberación de área
OLD-10541	Solicitud vigente en curso
OLD-10542X	Solicitud vigente en curso
OKM-10271	Solicitud vigente en curso
QJ1-10231	Solicitud vigente en curso

Fuente: ANM, 2017

Tabla 5. Títulos mineros otorgados

Títulos	
Código_exp	Modalidad
0047-73	Licencia de exploración
HC6-141	Contrato de concesión (L 685)
T258005	Licencia de exploración/Licencia de explotación
HGI-08106X	Contrato de concesión (L 685)
3452	Contrato de concesión (D 2655)
L853005	Contrato en virtud de aporte

Fuente: ANM, 2017

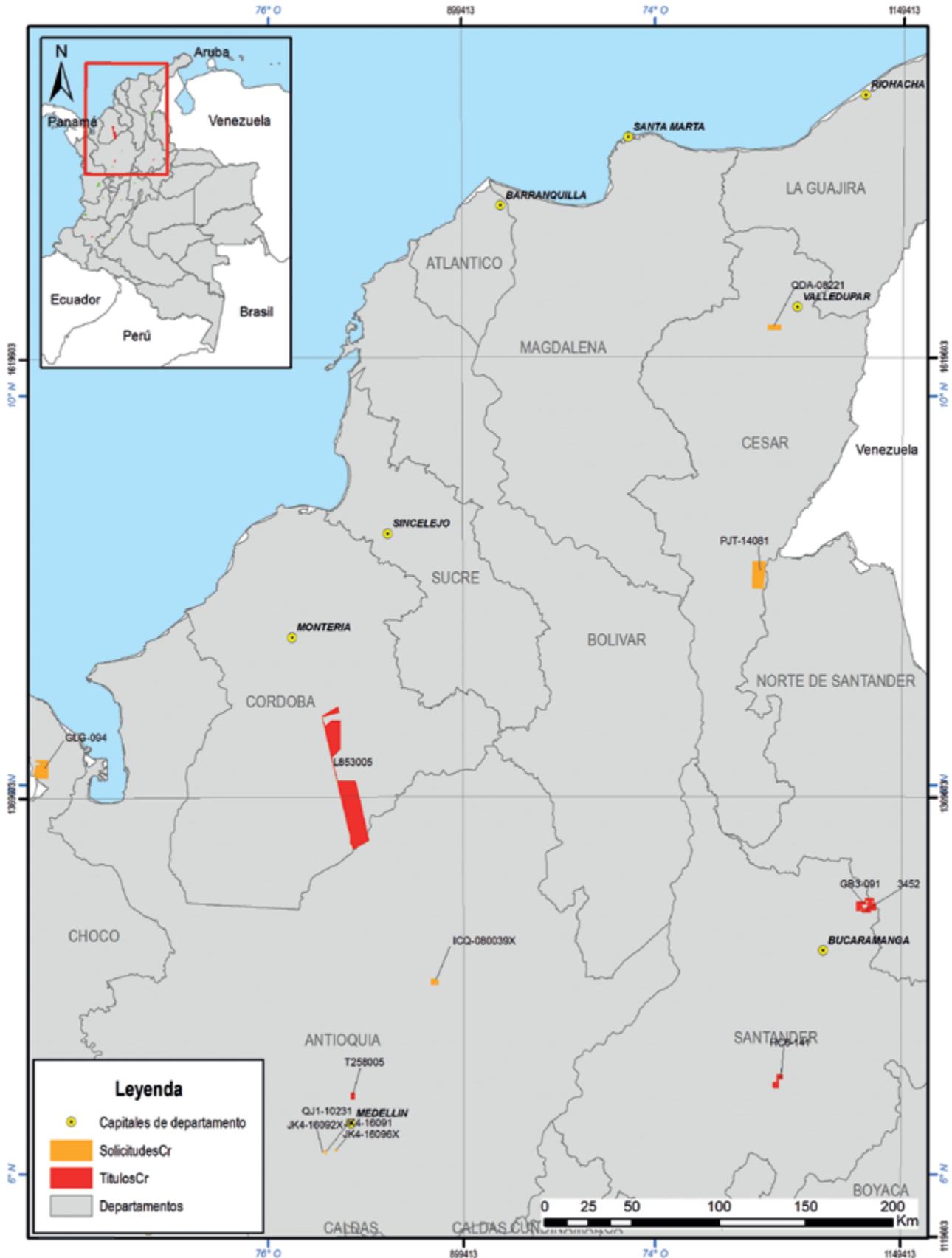


Figura 9. Títulos mineros vigentes y solicitudes de cromo en el sector Norte de Colombia, según Catastro Minero Colombiano

Fuente: Modificado de ANM (2017)

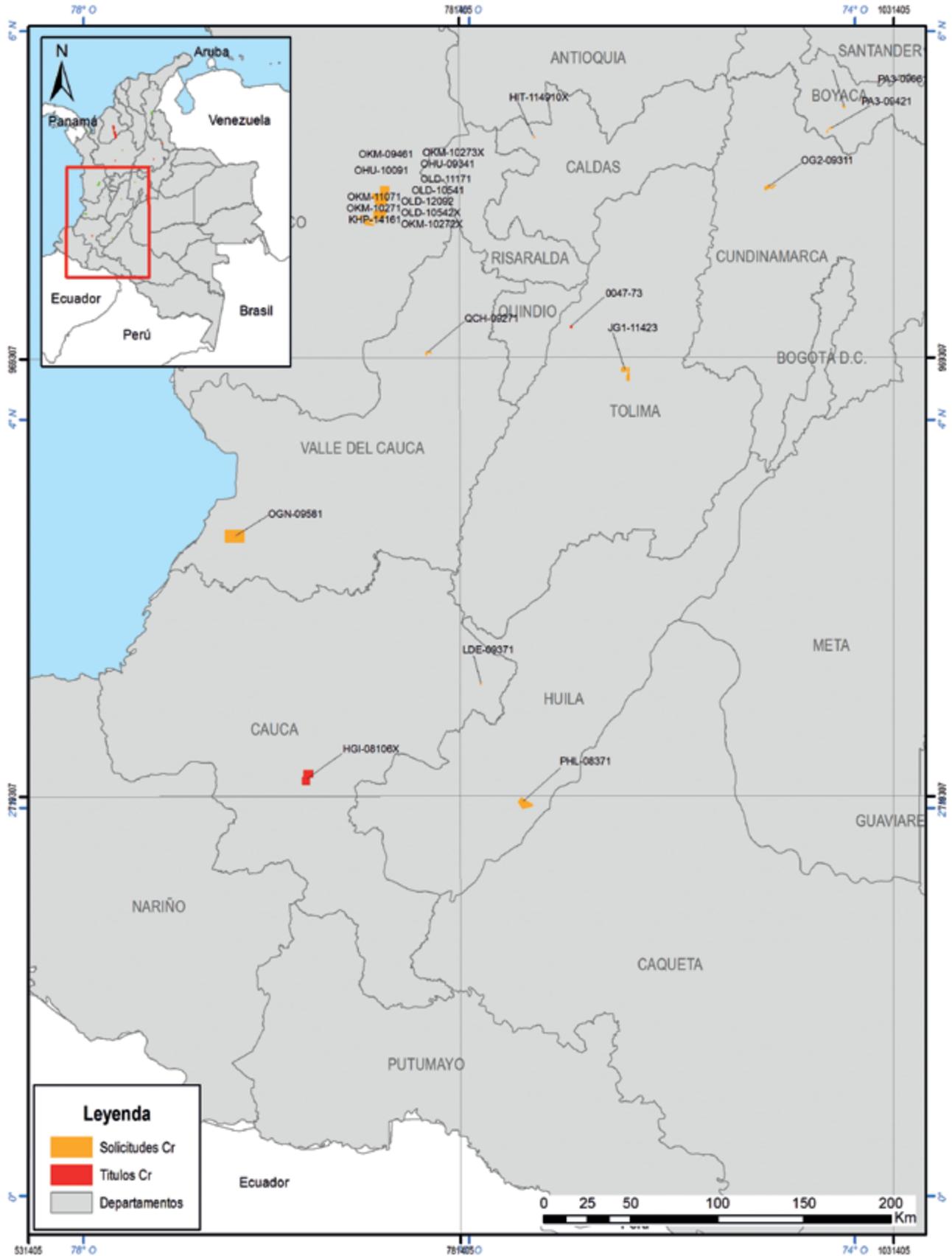


Figura 10. Títulos mineros vigentes y solicitudes de cromo en el sector occidental de Colombia, según Catastro Minero Colombiano

Fuente: Modificado de ANM (2017)

3.3.1. Potencial

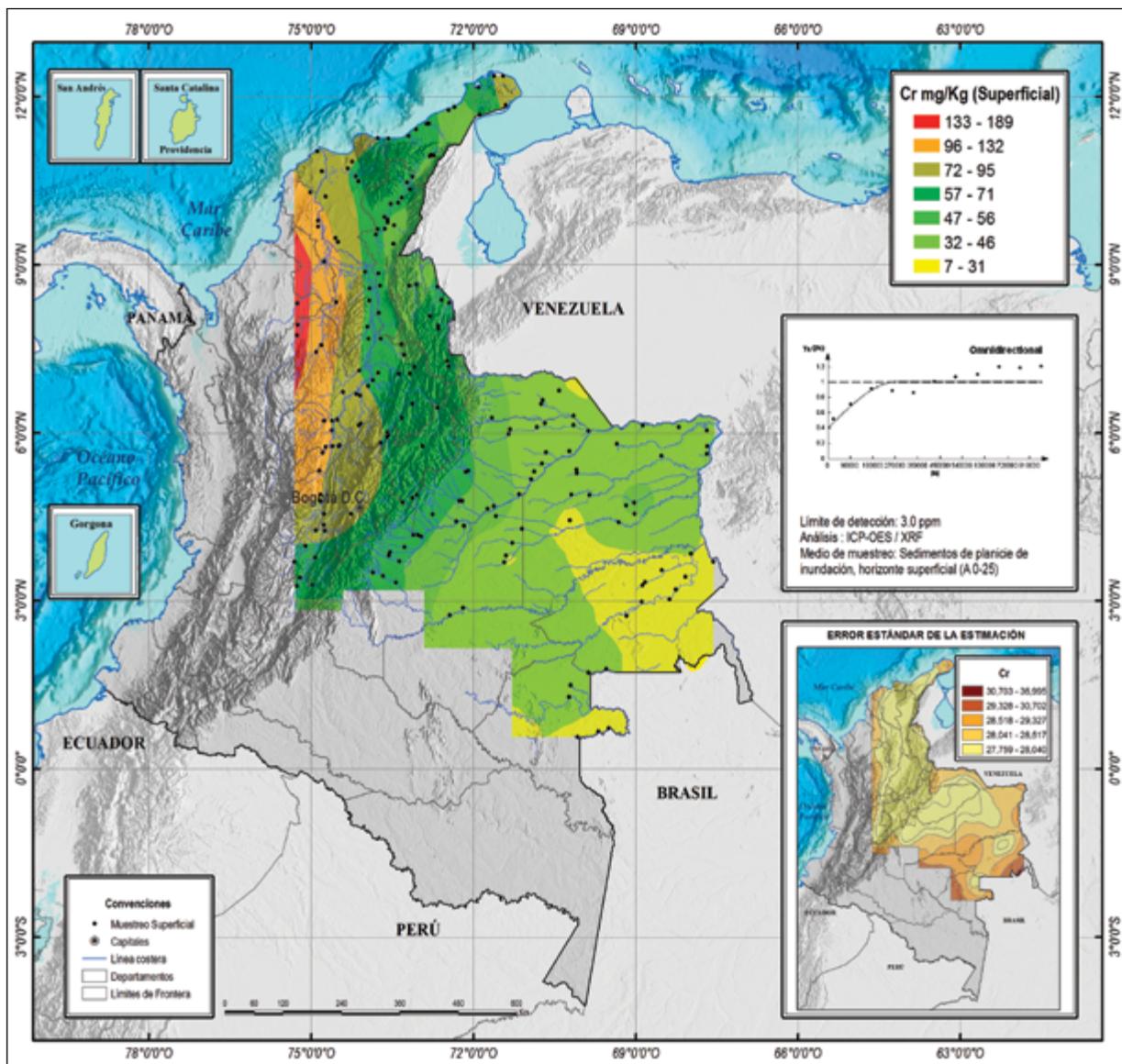
Las únicas reservas identificadas en el país han sido las de Santa Elena-Medellín (calculadas por Geominas Ltda en Álvarez, 1987.), que en 1975 ascendían a 20000 t probadas, ya extraídas. No obstante, las posibilidades de encontrar nuevos depósitos se circunscriben a las zonas de rocas máficas-ultramáficas en el occidente de Colombia y en el Cinturón Ofiolítico del Caribe, en la costa norte del país (Álvarez, 1987).

En el 2005 Ingeominas publicó el *Atlas geoquímico de Colombia-Mapeo de Ultra Baja Densidad (UBD)* (Prieto y García, 2005), que fue realizado en las regiones Andina, Caribe, Orinoquía y Amazonía, en las grandes cuencas hidrográficas allí presentes. En relación con el cromo se muestra en la figura 11 su distribución espacial y las ano-

malías presentes, confirmando lo dicho sobre la existencia de las zonas anómalas en los departamentos de Antioquia, Córdoba y La Guajira.

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el Cromo se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 41 148 registros analizados. (Servicio Geológico Colombiano, 2016a) (Figura 12).

Así mismo, el Mapa Metalogénico de Colombia. Versión 2016 que muestra la distribución espacial y temporal de depósitos y ocurrencias o manifestaciones minerales en un contexto geológico, en la figura se evidencia la información validada a la fecha (Servicio Geológico Colombiano, 2016b). (Figura 12).



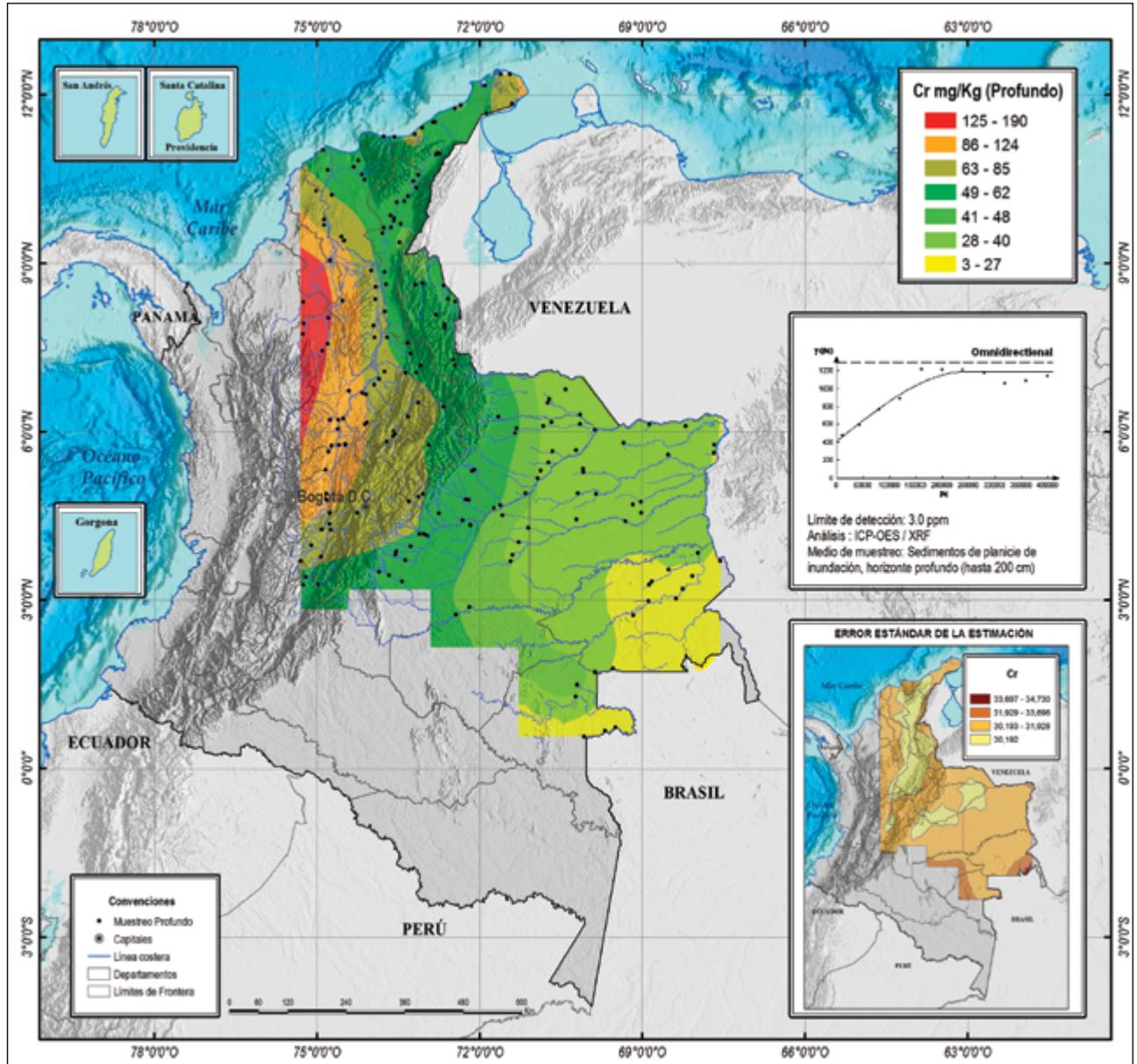


Figura 11. Distribución geoquímica del cromo en Colombia

Fuente: Prieto y García (2005)

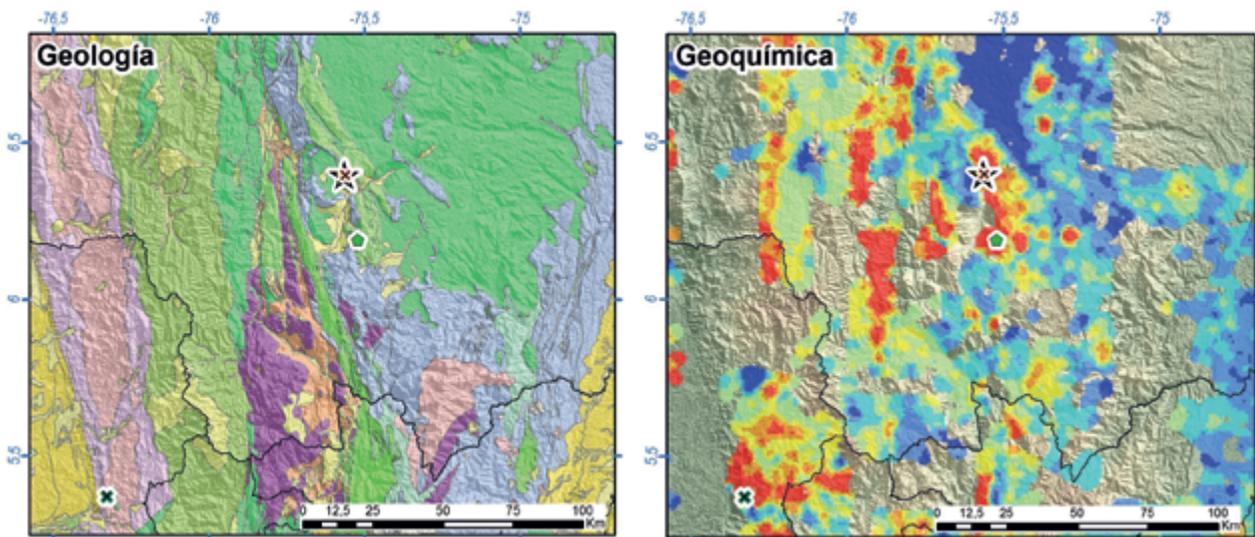


Figura 12. Distribución geoquímica del cromo en Colombia

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2016a y 2016b)

3.3.2. Comercio T2

Según la información suministrada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2016) en Colombia eran pocas las importaciones hasta el 2009, cuando comienzan a aumentar gradualmente, hasta alcan-

zar su máximo, con una cifra de 20 millones de kilogramos, en el 2015 (figura 13). Se tiene que en los últimos cinco años los bajos precios del cromo han favorecido las importaciones.

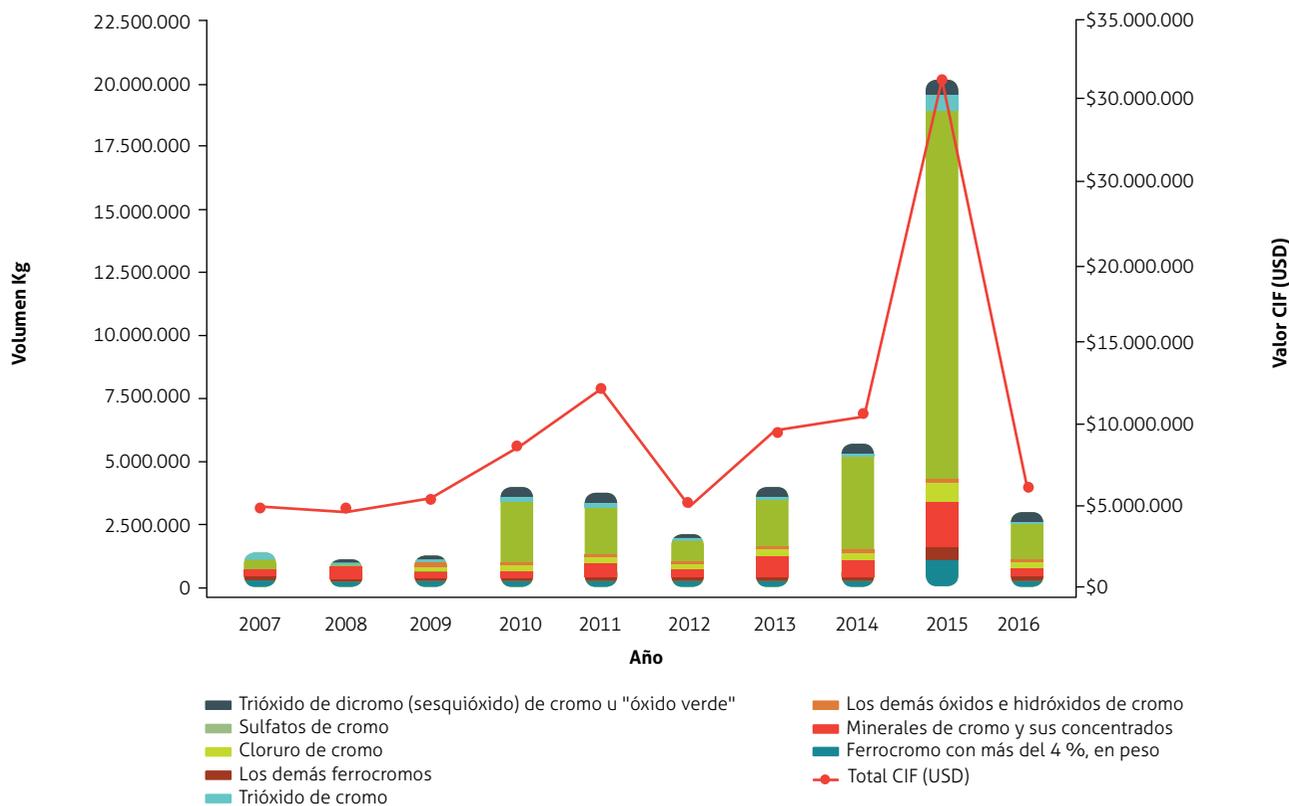


Figura 13. Importaciones colombianas de cromo en sus distintas presentaciones, 2007-2016

Fuente: DANE (2016)

El cromo en Colombia se comercializa como minerales de cromo y sus concentrados: trióxido de cromo; trióxido de dicromo (sesquióxido de cromo u “óxido verde”); los demás óxidos e hidróxidos de cromo (óxido de cromo I, óxido de cromo II, óxido de cromo III, óxido de cromo IV, óxido de cromo VI, peróxido de cromo VI); sulfatos de cromo; dicromato de sodio; los demás cromatos y dicromatos, y peroxocromatos.

En cuanto a la producción nacional, en los reportes de regalías del periodo 2012-2016 (ANM, 2016), se muestra en la tabla 6 la producción asociada a solo dos lugares: San Pedro (Antioquia) y Guapi (Cauca); para el 2016 no hay regalías generadas por este mineral en el país.

Tabla 6. Producción nacional y regalías periodo 2012-2016

Recurso mineral	2012		2013		2014		2015	
	Regalías (\$)	Producción (kg)						
Cromo-cromita	8703	17.1	17101	33.6	1188096	128.0	287728	30.0

Fuente: ANM (2016)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

El isótopo Cr^{6+} es altamente tóxico y en algunos compuestos puede ser cancerígeno; el isótopo Cr^{3+} es inofensivo: en los suelos el Cr^{6+} es más móvil que el Cr^{3+} , pero generalmente se reduce a Cr^{3+} en pocas semanas. Por lo general la absorción del cromo es baja en la mayoría de los vegetales salvo en la espinaca; algunos árboles, líquenes y hongos pueden absorber y acumular cromo (Reimann y de Caritat, 1998).

La deficiencia de cromo ha provocado un crecimiento perturbado en animales de pruebas en los laboratorios. La Environmental Protection Agency (EPA), en Estados Unidos, sugiere que el agua potable que exceda los niveles permitidos puede provocar irritación o úlceras en la piel y dañar el hígado, así como los tejidos circulatorios y nerviosos de los riñones a largo plazo (Reimann y de Caritat, 1998).

En cuanto a las posibilidades de sustitución, según el Instituto Geológico y Minero de España, (1991), la cromita no tiene sustitutos para la producción de ferrocromo, cromo químico y refractario de cromita. La chatarra de acero inoxidable puede sustituir el ferrocromo en usos metalúrgicos.

Con mayores costos y menores rendimientos el cromo puede sustituirse con aluminio, titanio, boro, manganeso, molibdeno, níquel y silicio en aleaciones férreas; por circonio y manganeso en aleaciones no férreas, y por molibdeno y vanadio en aleaciones a base de titanio. En refractarios se puede sustituir por magnesita y en la fabricación de pigmentos el sustituto más común es el cadmio.



Cromita
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Referencias

- Álvarez, J. (1980). *Proyecto de investigación sobre petroquímica y depósitos minerales en ofiolitas*. Medellín: Ingeominas.
- Álvarez, J. (1982). *Tectonitas Dunitas de Medellín*. Medellín: Ingeominas.
- Álvarez, J. (1983). *Rocas ultramáficas en Colombia y depósitos minerales asociados*. Medellín: Ingeominas.
- Álvarez, J. (1985). *Ofiolitas y evolución tectónica del occidente colombiano*. Medellín: Ingeominas.
- Álvarez, J. (1987). Recursos minerales de Colombia. Minerales de cromo. En *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Álvarez, J. y Muñoz, R. (1981). *Distribución de cromo, níquel y cobalto en la saprolita y en los concentrados de sedimentos fluviátiles derivados de las Dunitas de Medellín*. Medellín: Ingeominas.
- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2016). *Grupo de regalías y contraprestaciones económicas*. Documento interno. Bogotá.
- Agencia Nacional de Minería (ANM). (26 de abril, 2017). *Estado actual de títulos y solicitudes mineras en Colombia*. Bogotá.
- Ash, C. (1996). *Podiform Chromite* en Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, Volume 2 - Metallic Deposits. British Columbia Ministry of Employment and Investment, Open File 1996-13, 109-112
- Banerjee, S. (2006). *The World of Chromite Ore*. Cape Town: International Chromium Development Association Meeting.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). *Información Estadística de Minerales*. Bogotá.
- Duke, J.M. 1988. Magmatic Segregation Deposits of Chromite. En *Ore Deposit Models*. Geological Association of Canada.
- Garcés, H. (1995). *Geología económica de los yacimientos minerales - Yacimiento de Colombia - Minerales metálicos*. Medellín: Clave.
- González, H. (2001). *Memoria explicativa del Mapa geológico del departamento de Antioquia*. Técnico. Medellín: Ingeominas.
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME, (1991). *Cromo. Panorama nacional*. Disponible en <http://www.igme.es/PANORAMAMINERO/Historico/1991/Cromo.pdf>
- Ingeominas. (2006). *Mapa geológico colombiano escala 1:2.800.000*. Bogotá.
- International Chromium Development Association (ICDA). (2017). Disponible en <http://www.icdacr.com/index.php?lang=en>
- MetalBulletin. (2017). <https://www.metalbulletin.com/My-Price-Book.html?Tab=saved-prices>
- Mikami, M. (1983). *Industrial Minerals and Rocks*. Nueva York: American Institute Mining, Metallurgic and Petrology.
- Ortiz, F. (2006). Guías para la localización de metales preciosos en ofiolitas colombianas. *DYNA*, 142, 11-23.
- Papp, J. (2007). Chromium. En *Minerals Yearbook*. Virginia: United States Geological Survey.
- Prieto, G. y García, G. (2005). *Atlas geoquímico de Colombia-Mapeo de ultra baja densidad (UBD)*. Bogotá: Ingeominas.
- Proenza, J., Melgarejo, J., Gervilla, F., Lawat, W., Revé, D., y Rodríguez, D. (1988). Cromititas podiformes en la Faja Ofiolítica Mayarí - Baracoa (Cuba). *Acta Geológica Hispánica*, 33(1-4), 153-177
- Reimann, C. y Caritat, P. (1998). *Chemical Elements in the Environment - Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist*. Berlín: Springer-Verlag.
- Riba, O. (1997). *Diccionario de geología*. Barcelona: Enciclopedia Catalana.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016a). *Atlas geoquímico de Colombia. Versión 2016. Concentración de Cromo (Cr)*. Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016b). *Mapa metalogénico de Colombia*. Bogotá.
- Thayer, T. (1969). Gravity differentiation and magmatic reemplazamiento de podiform chromite deposits. En *Magmatic ore deposits*. Lancaster: Society of Economic Geologists.
- Thayer, T. (1972). Authigenic, polygenic and allogenic ultramafic and gabbroic rocks as hosts for magmatic ore deposits. En *Symposium on archean rocks*. Geological Society of Australia.
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Chromium. Mineral Commodity Summaries*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/chromium/mcs-2017-chrom.pdf>
- Vélez, M. (2000). *Chromium in refractories*. Missouri: University of Missouri.
- Webmineral. (s. f.). *General Chromite Information*. Disponible en <http://webmineral.com/data/Chromite.shtml#.Ww11VUgvxdg>