



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE LOS
ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO (EGP) EN
LAS LATERITAS NIQUELÍFERAS DE CERRO
MATOSO Y PLANETA RICA, COLOMBIA**

Mónica Janeth Tobón Mazo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2018

GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA DE LOS ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO (EGP) EN LAS LATERITAS NIQUELÍFERAS DE CERRO MATOSO Y PLANETA RICA, COLOMBIA

Mónica Janeth Tobón Mazo

Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería – Recursos Minerales

Director (a):

Ph.D., Marion Weber Scharff

Grupo de Investigación:

Grupo de Estudios Tectónicos - GET

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2018

*A Dios, mis padres y a mi gran amor y motivación: mi
hijo Santiago*

*“Que todo lo que soy alabe al Señor,
que nunca olvide lo bueno que ha hecho
en mí”.*

Agradecimientos

Este proyecto fue llevado a cabo gracias al soporte de diferentes personas y fundaciones, a quienes les agradezco en el alma:

- A Marion Weber, definitivamente no tengo palabras para agradecerle todo lo que me has apoyado, sin tu fuerza y ánimo constante, seguramente yo hubiera decaído en el camino, pero gracias a ti, mi amiga y mentora, he podido continuar con esta hermosa labor de investigar.
- Fundación Juan Pablo Gutiérrez Cáceres que en convenio con la Universidad Nacional de Colombia, financió mis gastos académicos de la maestría.
- La Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo a través de la XV Convocatoria ACGGP-Aportes Fondo Corrigan y Promoción de Jóvenes Investigadores ARES quienes brindaron apoyo económico para la realización de los análisis geoquímicos.
- La Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República, quienes también brindaron un fuerte apoyo económico para los diferentes análisis realizados en la Universidad de Barcelona.
- La Convocatoria Nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2016-2018, con el código de proyecto 35671.
- Las directivas de South 32Ltd, quienes hicieron los acompañamientos dentro de la Mina de Cerro Matoso y permitieron la toma de muestras de varios de los pozos perforados por ellos en Planeta Rica. Muchísimas gracias al Ingeniero Wilson Escobar que siempre estuvo presto para ayudar y nos brindó todos los recursos para realizar el trabajo de campo en Planeta Rica, al Ingeniero Esteban Gómez quien gestionó los accesos tanto a la mina como a Cerro Esmeralda. Gonzalo Castillo, quien fue mi mentor en Cerro Matoso y quien siempre ha tenido su corazón abierto para enseñar y aprender e hizo interesantes aportes en la etapa de muestreo. A todos y cada una de las personas

que nos brindaron su apoyo incondicional durante nuestra estancia en Montelíbano y Planeta Rica (Cristian Conde, Yuli, Yuris Daza, Guillermo Urango).

- Sebastián Betancur, sin su ayuda, realmente no hubiera sido posible realizar todos los análisis que se hicieron en Barcelona, y sobre todo por el tiempo dedicado a la preparación de la muestra, pues fue una labor muy lenta y de muchísima paciencia. Mil gracias.
- A todo el equipo de investigación en la Universidad de Barcelona, a Joaquín Proenza y Thomas Aiglsperger, sin su tiempo, dedicación y conocimiento, este proyecto no hubiese tenido los resultados obtenidos. A Núria Pujol Solá y Júlia Farré de Pablo, quienes apoyaron fuertemente todo el proceso de análisis de las muestras. Mil y mil gracias.
- También agradezco mucho al Semillero de Investigación SEMERU, quienes apoyaron el trabajo de campo y algunas fases del procesamiento de muestras, especialmente a Carlos Andrés Ramírez, Esteban Arrieta y Alejandro Argúmedo.

Resumen

Los elementos del grupo del platino (EGP) son metales esenciales en la industria de productos tecnológicos. Los minerales del grupo del platino (MGP) son considerados de interés estratégico para Colombia. En el mundo hay muy pocos depósitos de donde se extraen estos metales. Estudios recientes indican enriquecimiento residual y secundario de EGP en la zona de las limonitas a partir de lateritas de Ni. En el presente trabajo, se estudiaron dos perfiles de lateritas de Ni a partir de las rocas ultramáficas de la mina de Cerro Matoso y un perfil de Planeta Rica en Córdoba (Colombia), con el objetivo de conocer la concentración y distribución de EGP en ellos, así como la mineralogía de estos metales debido a que tradicionalmente han sido los principales focos de exploración de Ni en Colombia y Cerro Matoso es el único y más importante depósito de ferroníquel que se explota en la actualidad. El patrón litogeoquímico de ambas áreas indica que corresponden a depósitos tipo silicato hidratado de Mg, evidenciado por una alta concentración de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO y Co_3O_4 en los niveles superiores ($>60\text{wt}\%$, $>1.5\text{wt}\%$, $>0.6\text{wt}\%$ y $>0.2\text{wt}\%$, respectivamente) y una muy baja concentración de SiO_2 y MgO en el mismo horizonte ($<7\text{wt}\%$ y $<1.5\text{wt}\%$, respectivamente), además, los mayores contenidos de NiO se encuentra por debajo de la zona de discontinuidad de Mg con valores (1,5 – 2,5 wt%). Por otra parte, aunque Cerro Matoso es dominado por un depósito tipo silicato de Mg hidratado, contiene algunas áreas de tipo óxido como lo indica uno de los perfiles estudiados dentro de la mina. Los mayores contenidos de EGP tanto en Cerro Matoso como en Planeta Rica se concentran hacia el horizonte limonítico, principalmente en la zona de canga y transición limonita-saprolito y muestran una fuerte disminución tanto en la zona saprolítica como en la roca, con contenidos de EGP que varían entre 141 y 272ppb en la limonita y valores $<50\text{ppb}$ en la roca. Las concentraciones más altas corresponden a $\text{Pt}>\text{Ru}>\text{Pd}$ y las más bajas a $\text{Ir}>\text{Os}>\text{Rh}$. Dichas evidencias indican que los EGP son movilizados en diferentes proporciones por procesos de laterización. La alta afinidad entre los EGP y el Fe, favorece la formación de aleaciones minerales de EGP-Fe, tales como el MGP de Pt-Ir-Fe-Ni hospedado en un oxihidróxido de Fe encontrado en el horizonte de transición de laterita a saprolito en Planeta Rica. De manera adicional, se encontraron nanopartículas de probable Pt con tamaño $<1\mu\text{m}$ (en promedio $0,1\mu\text{m}$) formadas en los intersticios de pirita neoformada. Para ambos tipos de MGP encontrados el origen es secundario, en el primer caso evidenciado por su morfología irregular, aleación compleja comparable con aleaciones de EGP con Fe y Ni en lateritas de República Dominicana y en el segundo caso corresponde a neoformación de platinoides adheridos a los bordes porosos de la pirita, probablemente transportados en solución bajo condiciones ácidas y alto Eh. Aunque las concentraciones de EGP son del orden de ppb en Cerro Matoso y Planeta Rica, éstos deben ser considerados como depósitos no convencionales

de EGP si se aplican métodos de refinación adecuados para su recuperación como subproductos.

Palabras clave: Laterita de Ni, elementos del grupo del platino (EGP), minerales del grupo del platino (MGP), depósitos no convencionales, Cerro Matoso, Planeta Rica, Colombia.

Abstract

The platinum group elements (PGE) are essential metals in the technological products industry. The platinum group minerals (PGM) are considered strategic interest in Colombia. There are very few deposits in the world from which they are extracted. Recent studies indicate residual and secondary enrichment of PGE in the limonite zone from Ni laterites. In the present work, two Ni laterite profiles from the ultramafic rocks of the Cerro Matoso Mine and one profile of Planeta Rica in Colombia were investigated to know the PGE concentration and distribution in them, as well as the mineralogy of these metals due to the fact that traditionally they have been the main focuses of Ni exploration in Colombia and Cerro Matoso is the only and most important deposit of ferronickel that is currently exploited. The lithochemical pattern of both areas indicate that they correspond to hydrous Mg silicate deposits, evidenced by a high concentration of Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO , Co_3O_4 y in the higher levels (>60wt%, >1.5wt%, >0,6wt% and >0,2 wt%, respectively) and a very low concentration of SiO_2 y MgO in the same horizon (< 7wt% and < 1.5 wt%, respectively), in addition, the highest NiO content is below the Mg-discontinuity zone with values (1.5 – 2.5 wt%). On the other hand, although Cerro Matoso is dominated by a hydrous Mg silicate deposit, it contains some oxide-type areas as indicated by one of the profiles studied inside the mine. The highest contents of PGE either in Cerro Matoso as well as in Planeta Rica are concentrated towards limonite horizon, mainly in the canga and laterite – saprolite transition zones and show a strong decrease in the saprolite and rock, with PGE content ranging between 141 and 272ppb in limonite and values < 50ppb in the rock. The highest concentrations correspond to $\text{Pt}>\text{Ru}>\text{Pd}$ and the lowest to $\text{Ir}>\text{Os}>\text{Rh}$. Such evidence indicates that EGPs are mobilized in different proportions by the lateralization processes. The high affinity between EGP and Fe favours the formation of mineral alloys of PGE-Fe, such as the PGM of Pt-Ir-Fe-Ni hosted in a Fe-oxo/hydroxide found in the transition horizon from laterite to saprolite in Planeta Rica. In addition, nanoparticles of probable Pt with size < 1 μm (on average 0,1 μm) formed in the interstices of neoformed pyrite were found. For both types of MGP found, the origin is secondary, in the first case is evidenced by its irregular morphology, complex alloy comparable with alloys of PGE with Fe and Ni in laterites of Dominican Republic and in the second case it corresponds to the neoformation of platininoids adhered to the porous edges of the pyrite, probably transported in solution under acidic and high Eh conditions. Although PGE concentrations are of the order of ppb in Cerro Matoso and Planeta Rica, these should be considered unconventional PGE deposits if adequate refining methods are applied for recovery as by-products.

Keywords: Ni-laterite, platinum group elements (PGE), platinum group minerals (PGM), unconventional deposits, Cerro Matoso, Planeta Rica, Colombia.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1: Generalidades	3
1.1 Introducción.....	3
1.1.1 Elementos del grupo del platino en el mundo.....	4
1.1.2 Elementos del grupo del platino en lateritas.....	5
1.1.3 Platino y Níquel en Colombia	6
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Contexto Geológico Regional.....	8
1.4.1 Ultramafita de Cerro Matoso.....	9
1.4.2 Peridotitas de Planeta Rica	13
1.5 Metodología de trabajo.....	15
1.5.1 Trabajo de campo.....	15
1.5.2 Selección de muestras para análisis químico y petrográfico	16
1.5.3 Análisis petrográfico.....	17
1.5.4 Análisis geoquímico	17
1.5.5 Concentración de minerales pesados	18
1.5.6 Técnica para la caracterización mineralógica de minerales pesados.....	21
1.5.7 Creación de un Semillero de Investigación Estudiantil	22
2. Capítulo 2: Trabajo de campo	25
2.1 Mina de Cerro Matoso S.A (CMSA).....	25
2.1.1 Muestreo.....	25
2.2 Planeta Rica	31
2.2.1 Muestreo.....	32
3. Capítulo 3: Análisis Petrográfico.....	35
4. Capítulo 4: Análisis Geoquímico.....	39
4.1 Geoquímica de Cerro Matoso	39
4.1.1 Geoquímica de elementos mayores y menores en Cerro Matoso	39
4.1.2 Geoquímica de los elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au en el área de Cerro Matoso	44
4.1.3 EGP normalizados en perfiles de meteorización de Cerro Matoso a la condrita... 46	46
4.2 Geoquímica del perfil laterítico de Planeta Rica	48

4.2.1	Geoquímica de elementos mayores y menores en Planeta Rica	48
4.2.2	Geoquímica de los elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au en Planeta Rica 49	
4.2.3	EGP normalizados en perfil de meteorización de Planeta Rica a la condrita	50
4.3	Diagramas de comparación entre Cerro Matoso y Planeta Rica.....	51
4.4	Diagrama de comparación entre los perfiles lateríticos de Cerro Matoso, Planeta Rica (Colombia), República Dominicana y Cuba.....	55
5.	Capítulo 5: Mineralogía de los MGP	57
5.1	MPG en zona de transición del horizonte limonítico con el saprolito.....	58
6.	Capítulo 6: Discusión	63
6.1	Perfil litogeoquímico de Cerro Matoso y Planeta Rica.....	63
6.2	Enriquecimiento de los EGP en las lateritas de Cerro Matoso y Planeta Rica.....	64
6.3	MGP en el perfil laterítico de Ni de Planeta Rica	67
7.	Conclusiones	70
7.1	Impactos del proyecto.....	71

Lista de figuras

	Pag.
Figura 1-1. Distribución global de los mayores depósitos de EGP magmáticos.	5
Figura 1-2. Ubicación de los cuerpos ultramáficos de Planeta Rica (PR), Cerro Matoso (CMSA), el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC) y demás ultramáficos en Colombia.	7
Figura 1-3. Contexto geológico regional y rasgos estructurales del área de estudio correspondientes a las Peridotitas de Planeta Rica y la Ultramafita de Cerro Matoso.	10
Figura 1-4. Ubicación de la Mina de Cerro Matoso y contexto geológico.	11
Figura 1-5. Representación esquemática de los perfiles de meteorización de los Pit 1 y 2 en la Mina de Cerro Matoso.	12
Figura 1-6. Mapa geológico de Planeta Rica.	14
Figura 1-7. Imágenes del microscopio óptico marca Olympus Modelo BX53M.	17
Figura 1-8. Proceso de tamizado en húmedo para una porción de la muestra PR-1136-SC.	19
Figura 1-9. Baño de ultrasonido.	20
Figura 1-10. Hidroseparación.	21
Figura 1-11. Equipo SEM-EDS de la Universidad de Barcelona, España.	22
Figura 2-1. Vista del afloramiento CMM-01 en el Cerro Esmeralda y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.	27
Figura 2-2. Vista del afloramiento CMM-02 en el tope del Cerro Esmeralda y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.	28
Figura 2-3. Perfil de meteorización inmaduro (laterita + peridotita) presente en el Banco 154 del Pit 2, al interior de la Mina de Cerro Matoso.	29
Figura 2-4. Vista del afloramiento CMM-03 en el Banco 154 del Pi 2 y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.	30
Figura 2-5. Vista Panorámica del Cerro Porvenir.	31
Figura 2-6. Vista Panorámica de los Cerro Porvenir y Queresas.	31
Figura 2-7. Fotografía de las cajas con los núcleos de perforación del pozo PR-1136.	34
Figura 2-8. Esquema de los perfiles de meteorización de los pozos perforados en Planeta Rica.	34
Figura 3-1. Diagrama de clasificación de rocas ultramáficas, según Streckeisen (1976) para las muestras de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).	36
Figura 3-2. Microfotografías de rocas ultramáficas de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).	37

Figura 4-1. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso mostrando los contenidos de elementos mayores y menores relevantes.....	43
Figura 4-2. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso mostrando los contenidos de elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au.....	45
Figura 4-3. Patrones de EGP normalizados a la condrita de las muestras de dos perfiles de laterización en la Mina de Cerro Matoso.....	47
Figura 4-4. Perfil de meteorización del pozo PR-1136 (Planeta Rica) mostrando los contenidos de elementos mayores y menores relevantes.....	49
Figura 4-5. Perfil de meteorización del pozo PR-1136 (Planeta Rica) donde se observa la variación de los contenidos de EGP, Sc y Au.....	50
Figura 4-6. Patrones de EGP normalizados a la condrita de las muestras del pozo PR-1136 (Planeta Rica).....	51
Figura 4-7. Comparación del contenido de IPGE (Os+Ir+Ru) vs PPGE (Pt+Pd+Rh) y Sc en los perfiles lateríticos de Cerro Matoso y Planeta Rica.....	52
Figura 4-8. Diagrama de correlación IPGE/PPGE entre Cerro Matoso (CMSA) y Planeta Rica.....	53
Figura 4-9. Diagramas de correlación: A) Pt vs Pd. B) Pt vs Rh. C) Pt vs Ru. D) Pt vs Ir. E) Pt vs Os.....	54
Figura 4-10. Comparación del contenido total de IPGE y PPGE en los depósitos de Cerro Matoso (CMSA) y Planeta Rica (Colombia), respecto a los valores registrados por Aiglsperger et al., (2016) en los depósitos de Moa Bay (Cuba) y Falcondo (República Dominicana).	56
Figura 5-1. Imágenes de barrido de electrones retrodispersados (BSE, Back-Scattered Electrons) por SEM y FE-SEM del MGP encontrado en la muestra PR-1136-SC de Planeta Rica.....	59
Figura 5-2. Imágenes BSE por FE-SEM de las partículas de pirita (Py) neoformadas con microcristales de alta reflectancia de posibles platinoideos en los intersticios de los cristales en la muestra PR-1136-SC de Planeta Rica.....	60
Figura 6-1. Comparación del contenido total de EGP en los depósitos de Cerro Matoso y Planeta Rica (Colombia), respecto a los valores registrados por Aiglsperger et al., (2016) en otros depósitos del Caribe.....	66
Figura 6-2. Diagramas de correlación entre los EGP y Fe ₂ O ₃ , MnO, Cr ₂ O ₃ y Co ₃ O ₄	68
Figura 6-3. Diagrama Eh-pH para el sistema Pd-Pt-H ₂ O-Cl a 25°C.....	69

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Coordenadas de ubicación de los perfiles muestreados en la Mina de Cerro Matoso S.A	26
Tabla 2-2. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-01.	26
Tabla 2-3. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-02.	27
Tabla 2-4. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-03.	29
Tabla 2-5. Coordenadas de ubicación de los pozos de perforación muestreados en el Cerro Porvenir por parte de la empresa South32 Ltd.	31
Tabla 2-6. Características físicas generales de los niveles de meteorización de la Peridotita de Planeta Rica.	32
Tabla 3-1. Asociación mineralógica en las muestras de roca de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).	35
Tabla 4-1. Contenido de elementos óxidos mayores, menores (en wt%) y elementos del grupo del platino y oro (en ppb) de tres perfiles de meteorización de la Ultramafitita de Cerro Matoso y la Peridotita de Planeta Rica.	41

1. Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

Los elementos del grupo del platino (EGP) pertenecen a los denominados “metales de alta tecnología”, que son metales raros pero esenciales para la industria de productos tecnológicos (Aiglsperger et al., 2016; Lusty, 2016; European Commission, 2018). En Colombia, el platino (Pt) y sus minerales asociados, derivados o concentrados han sido catalogados de interés estratégico para el país que definen áreas estratégicas mineras en algunas zonas del territorio colombiano a través de la Resoluciones 180102 de 2012 y 135 de 2017 (Ministerio de Minas y Energía, 2012; Agencia Nacional de Minería, 2017).

En el mundo, los depósitos de minerales del grupo del platino (MGP) de significancia económica son muy raros (Green & Peck, 2005; Holwell & McDonald, 2010), sin embargo, es conocido que las principales fuentes de estos minerales se presentan en tres ambientes geológicos principales: 1) Depósitos de sulfuro de níquel magmático de alto S, ejemplo: Noril'sk-Talnakh (Rusia), el cual es uno de los mayores productores de EGP en el mundo e Intrusiones ígneas ultramáficas bandeadas de bajo S, ejemplo: Bushveld y Gran Dique (África) y Stillwater (Estados Unidos). 2) Depósitos de placer de EGP a partir de intrusiones ultramáficas tipo Alaskano, ejemplo: Urales y Colombia y 3) Depósitos de EGP en ofiolitas, ejemplo: Troodos (Chipre), Ray-Iz (Rusia), Shetlands (Reino Unido), que contienen las concentraciones más bajas de EGP respecto a los otros dos tipos de depósitos (Green & Peck, 2005; Holwell & McDonald, 2010).

Según Proenza et al (2004), el mayor potencial metalogénico de estos elementos en ofiolitas está principalmente asociado a mineralizaciones en cromititas y sulfuros magmáticos.

Por otro lado, estudios más recientes en perfiles lateríticos de cuerpos ultramáficos ricos en níquel indican enriquecimiento residual y secundario de EGP en la zona de las limonitas, el cual puede ser independiente de la presencia de cuerpos de cromititas (Proenza, 2015; Aiglsperger et al., 2015, 2016), lo que constituye un objetivo de exploración no convencional de estos elementos.

El objetivo de esta investigación se enfoca en crear una línea base de investigación sobre la ocurrencia y distribución de EGP en lateritas formadas a partir de rocas ultramáficas, tomando como caso de estudio las unidades de Cerro Matoso y Planeta Rica, debido a que

tradicionalmente han sido los principales focos de exploración de níquel en Colombia. En términos de extracción, Cerro Matoso es el único y más importante depósito de ferroníquel que se explota en la actualidad en Colombia (Agencia Nacional de Minería, 2015a). Los resultados de este estudio pueden favorecer a la apertura de nuevos objetivos de exploración de platino, especialmente en Colombia, además de servir como ejemplo de ocurrencia de EGP en otras lateritas níquelíferas del mundo.

1.1.1 Elementos del grupo del platino en el mundo

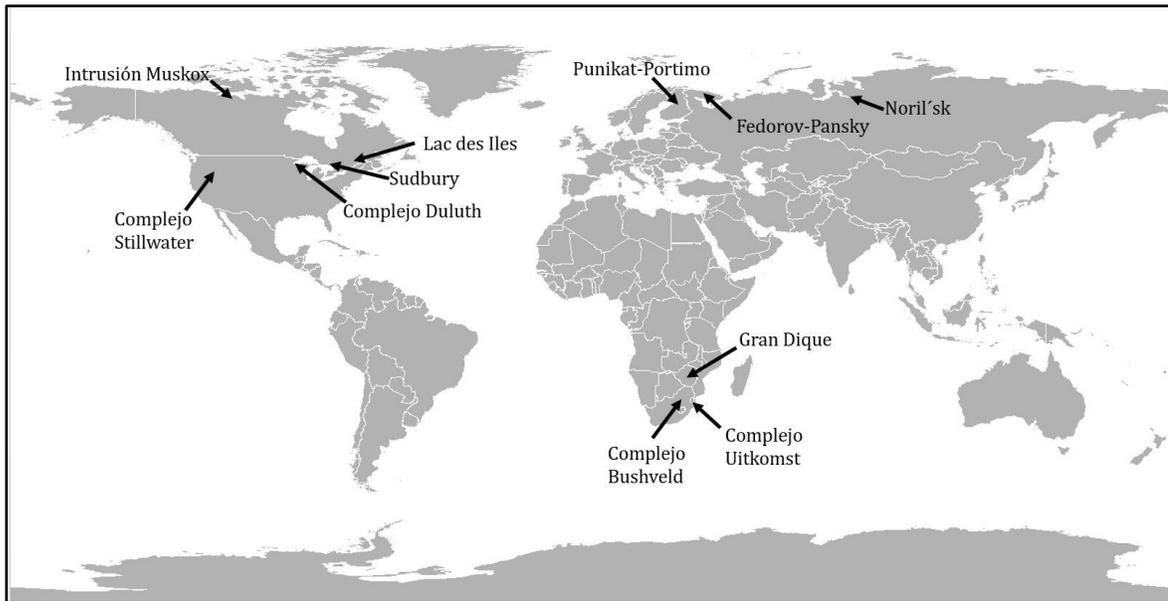
Los EGP son: rutenio (Ru), rodio (Rh), paladio (Pd), osmio (Os), iridio (Ir) y platino (Pt) y son considerados “metales de alta tecnología” dadas sus características físicas y químicas que permiten su uso en diversos campos de la industria. El uso más destacado es como convertidores catalíticos para reducir las emisiones de los automóviles, pero también son utilizados como catalizadores de refinado en la industria del petróleo, en cables de fibra óptica, joyería, equipos de laboratorio y en el sector médico (U.S Geological Survey, 2018). De los 69 millones de kilogramos de reservas de MGP que hay en el mundo, el 91% de ellas se encuentran en el Complejo Bushveld en Sur África, así mismo, es la mayor productora y exportadora mundial de estos minerales (Aiglsperger et al., 2016; U.S Geological Survey, 2018).

Los EGP con mayor impacto económico (**Figura 1-1**) se presentan en depósitos de sulfuro de Ni de alto S, tales como Noril'sk/Talnakh (Rusia) y Sudbury (Canadá) con contenidos de EGP de hasta 5,6 ppm (Green & Peck, 2005). Depósitos estratiformes de grandes intrusiones bandeadas tales como el Reef de Merensky y Cromitita UG2 del Complejo Bushveld (Sur África), la zona principal de sulfuro del Gran Dique (Zimbabwe) y el Reef de Johns-Manville del Complejo Stillwater (USA) (Cawthorn, 2005; Economou-Eliopoulos, 2010; Holwell & McDonald, 2010) con contenidos de EGP que van desde 4 ppm hasta 18 ppm (Cawthorn, 2005; Green & Peck, 2005).

Por otra parte, los complejos ígneos máficos-ultramáficos zonados tipo alaskano también son fuente de importantes concentraciones de EGP en depósitos de placer, como por ejemplo el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC) en Colombia (Salinas, Muñoz, Burgath y Tistl, 1992).

En complejos ofiolíticos, el potencial metalogénico de estos elementos está en ofiolitas de zonas de supra-subducción (ZSS), principalmente asociados a mineralizaciones en cromititas y zonas ricas en sulfuros de Fe-Ni-Cu, con contenidos de Pt que van desde 6 ppb hasta valores superiores a 400 ppb (Proenza et al., 2004; Economou-Eliopoulos, 2010).

Figura 1-1. Distribución global de los mayores depósitos de EGP magmáticos. Modificado de Holwell & McDonald (2010).



1.1.2 Elementos del grupo del platino en lateritas

Estudios recientes han encontrado que los procesos de laterización en rocas ultramáficas favorecen el enriquecimiento residual y secundario de EGP, y que su concentración puede ser independiente de la presencia de cromitas (Proenza, 2015; Aiglsperger et al., 2015, 2016). Además, las condiciones de Eh, pH, la acción microbiana y la presencia de materia orgánica pueden favorecer la movilidad, reprecipitación y concentración de MGP en lateritas (Bowles, 1986; Augé & Legendre, 1994; Bowles, Gize, Vaughan & Norris, 1994; Proenza et al., 2004; Aiglsperger et al., 2015, 2016).

Por ejemplo, en un estudio realizado al SW del lóbulo del Complejo Bushveld, Kiefer y Viljoen (2006) identificaron varias zonas potenciales de exploración de Pt relacionados a un área de transición de alto contenido de Ni (>220 ppm) a una de bajo contenido de Ni en harzburgitas alteradas. Estudios realizados sobre mineralización de EGP en el complejo ofiolítico de Nueva Caledonia (zona de Pirogues) registraron valores de Pt de hasta 2 ppm en laterita (Augé & Legendre, 1994) y el proyecto minero Owendale Platinum and Scandium ubicado en New South Wales (Australia), aún en desarrollo (estudio de prefactibilidad positivo lanzado en Julio de 2017), es el depósito de Sc-Pt-Co y Ni en laterita ultramáfica tipo Alaskano más grande del mundo, con recursos minerales medidos de 94 koz de platino y 4700 toneladas de óxido de escandio (Sc₂O₃) (Platina Resources Limited, 2017).

Por otra parte, también se han registrado bajas concentraciones de EGP en lateritas, como en las lateritas de Fe-Ni en Grecia cuyos valores promedios de Pt y Pd son de 44 y 29 ppb, respectivamente y valores máximos de 88 ppb de Pt y 186 ppb de Pd (Eliopoulos & Economou-Eliopoulos, 2000) y en las lateritas de Falcondo en República Dominicana se identificaron

contenidos de EPG que van desde 36 ppb en la roca parental hasta 640 ppb en la zona de limonita (Aiglsperger et al., 2015; Proenza, 2015).

En dichos estudios, los autores concluyen que los valores más bajos de EPG se encuentran en la zona de los saprolitos y la roca y los valores más altos en la zona de las limonitas.

1.1.3 Platino y Níquel en Colombia

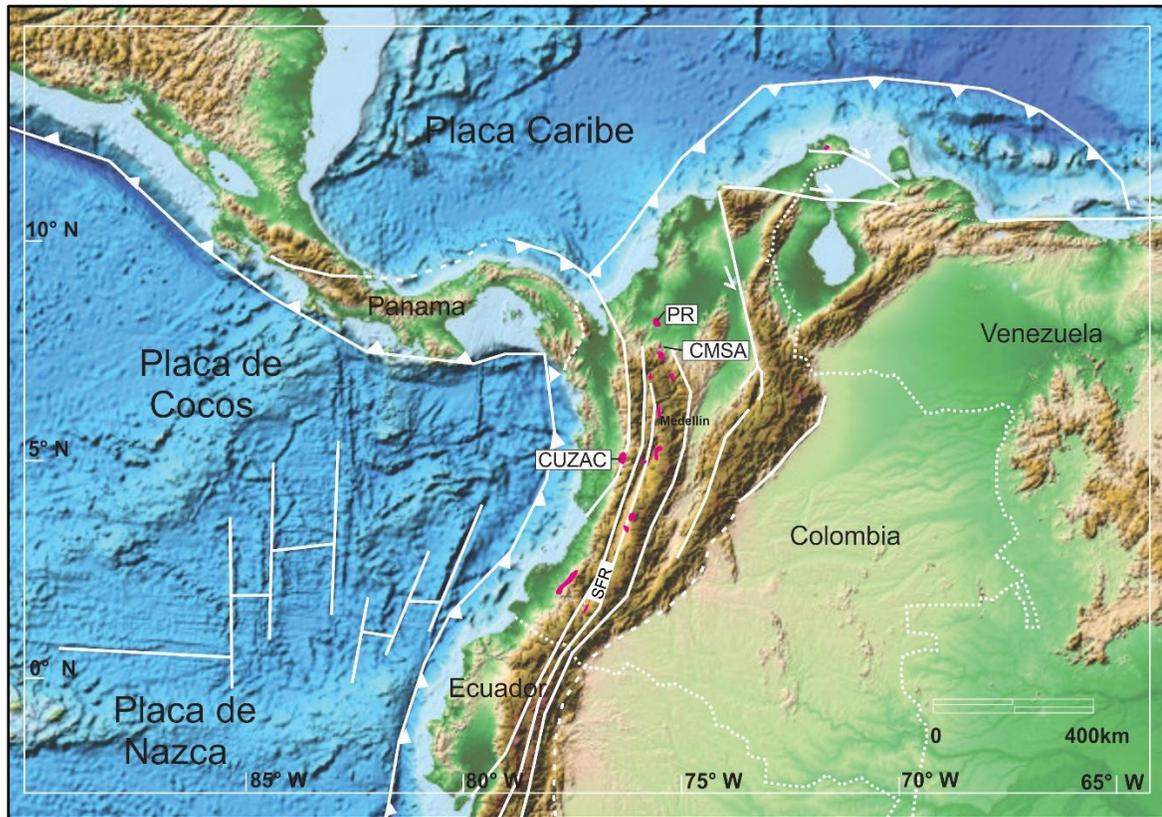
La mayor parte del Pt en Colombia se extrae por métodos tradicionales de los depósitos aluviales de la costa pacífica, en los afluentes de los ríos San Juan, Atrato y Condoto y se considera que la fuente primaria de la mayor parte de los MGP aluvial de esta zona es el CUZAC (**Figura 1-2**) de edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior ubicado en el occidente colombiano (Salinas et al., 1992).

De acuerdo a datos de la Agencia Nacional de Minería de Colombia (2015b), sólo se tenían identificadas como zonas potenciales de Pt, principalmente aluviones del departamento del Chocó, y en menor proporción Cauca, Caldas y Antioquia. A 2017, se registró una producción de 163.733 g de Pt en Colombia, donde el 97% se dio en el departamento del Chocó (UPME, 2018).

Por otra parte, en Colombia se reconocen alrededor de seis (6) yacimientos de Ni: Cerro Matoso, Planeta Rica y Uré, ubicados en el departamento de Córdoba y los yacimientos de Ituango, Morro Pelón y Medellín, ubicados en el departamento de Antioquia (Castro, 1987; Forero-Castañeda, Londoño de los Ríos, Manrique-Galvis y Rojas-Cruz, 2009). Sin embargo, el depósito de laterita níquelífera de la mina de Cerro Matoso S.A. operado desde 1982, es el único que se encuentra en la actualidad en explotación para Ni en Colombia (Castro, 1987; Forero Castañeda et al., 2009) con una producción de 49.000 toneladas métricas de Ni reportadas en 2017 (U.S Geological Survey, 2018).

Cerro Matoso hace parte de una serie de rocas ultramáficas en el norte de Colombia (**Figura 1-2**) consideradas como parte del Complejo Ofiolítico del Cauca de edad cretácica (López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996; Gleeson, Herrington, Durango, Velásquez & Koll, 2004). Este Complejo incluye la unidad ultramáfica de Planeta Rica (**Figura 1-2**), que presenta algunas similitudes composicionales con Cerro Matoso, y del cual se considera como la continuación más norte del Complejo Ofiolítico (Castro, 1987).

Figura 1-2. Ubicación de los cuerpos ultramáficos de Planeta Rica (PR), Cerro Matoso (CMSA), el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC) y demás ultramáficos en Colombia. Mapa elaborado con base en (Salinas et al., 1992; Gómez, Monte, Nivia y Diederix, 2015).



1.2 Planteamiento del problema

Los estudios que se han realizado sobre el depósito de Cerro Matoso se han concentrado en el análisis del origen geológico del depósito y algunos estudios detallados de caracterización mineralógica del perfil de meteorización (López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996; Gleeson et al., 2004). Tanto para Cerro Matoso como para Planeta Rica los elementos químicos analizados refieren principalmente a los elementos mayores: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , MnO y Fe y algunos elementos menores: Ni , Cr y Co (Naciones Unidas, 1975; Hoyos y Velázquez, 1996; Gleeson et al., 2004). En menor proporción se han realizado análisis de otros elementos menores como P , Ti , Cu y Zn y elementos traza como Sc , Ba , V , La , Sr , Y y Zr (Gleeson et al., 2004).

Sin embargo, un estudio publicado por Ortiz et al. (2004), acerca de la presencia de metales preciosos (Au , Ag y platinoides) en Colombia, que incluyen la Dunita de Medellín, Cerro Matoso (Córdoba) y el yacimiento de sulfuros masivos de El Roble, denotan un potencial por explorar, ya que se detectaron valores de >6 ppm de Au en la canga magnética de Cerro Matoso, valores de hasta 874 ppb de Pt , 810 ppb de Pd y 54 ppb de Au en la Dunita de Medellín y un promedio de 3,23 ppm de Au y hasta 38,9 ppm de Ag en El Roble.

Se plantea en esta propuesta estudiar las unidades ultramáficas de Cerro Matoso y Planeta Rica con el objetivo de evaluar su potencial platinífero, y aportar al conocimiento del proceso de concentración de los EGP en las lateritas. Los resultados de este estudio servirán para la apertura de nuevos objetivos exploratorios de EGP en Colombia y el mundo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar el potencial mineral de los Elementos del Grupo del Platino (EGP) en las lateritas níquelíferas de Cerro Matoso y Planeta Rica, Colombia.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la mineralogía y geoquímica de los EGP de los perfiles lateríticos de dos áreas de interés: Cerro Esmeralda, ubicado al NW de la zona actual de explotación de Cerro Matoso y la peridotita intermedia de las tres ultramafitas de Planeta Rica denominada Cerro Porvenir.
2. Comparar los resultados de la caracterización geoquímica y mineralógica de los EGP con otros depósitos lateríticos del Caribe, como Cuba y República Dominicana.
3. Fortalecer la línea de investigación en la apertura de nuevos objetivos de exploración de Pt en Colombia.

1.4 Contexto Geológico Regional

Los cuerpos ultramáficos de Cerro Matoso y de Planeta Rica han sido relacionados a terrenos alóctonos acrecionados del Cretácico Superior a través del Sistema de Fallas de Romeral (SFR) (López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996; Gleeson et al., 2004; Villagómez, 2010). Estas rocas se encuentran ubicadas al noroccidente de Colombia entre la unidad estructural denominada Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ) y la subcuenca de San Jorge del Valle Inferior del Magdalena (VIM) (**Figura 1-3**).

El CPSJ es limitado al oriente por la subcuenca de San Jorge y están separados por el SFR y al occidente por el Lineamiento Sinú y está conformado por tres anticlinorios: San Jerónimo, San Jacinto y Luruaco (Duque-Caro, 1980; González y Londoño, 2001; Geotec Ltda, 2003; Guzmán, Gómez y Serrano, 2004), cuyas sedimentitas marinas con influencia terrígena (Fm. Cansona del Cretácico Superior, Fm. San Cayetano del Paleoceno superior al Eoceno inferior, Fm. Chengue y San Jacinto del Eoceno medio a superior) se depositaron en un ambiente de ante arco marino y fueron acrecionados al margen norte de Colombia en el Eoceno (Villagómez, 2010; Mora et al., 2017). Mora et al. (2017), con base a geocronología U/Pb en circones detríticos, sugieren que las secuencias San Cayetano, Chengue y San Jacinto provienen de arcos magmáticos de afinidad continental y oceánica del Cretácico Superior.

1.4.1 Ultramañita de Cerro Matoso

La Ultramañita de Cerro Matoso (Naciones Unidas, 1975) está ubicada a 22 Km aproximadamente hacia el SW del municipio de Montelíbano, departamento de Córdoba, sobre la vía que conduce de Montelíbano a Puerto Libertador (**Figura 1-4**). Se presenta como un cerro con una altura máxima de 254 m.s.n.m (antes de que se iniciara explotación minera en él), cubre un área aproximada de 425 Ha, tiene forma ovalada y alargada en sentido NW (Hoyos y Velázquez, 1996; González y Londoño, 2001).

En términos geológicos, se ubica al sur del CPSJ, extremo sureste del anticlinorio de San Jerónimo y está limitada al oriente por el SFR y al occidente por el Lineamiento Sinú (**Figura 1-3**). Corresponde a una harzburgita parcialmente serpentinizada (López-Rendón, 1986; González y Londoño, 2001; Gleeson et al., 2004) que infrayace discordantemente las areniscas, limolitas y mantos de carbón de la Formación Cerrito de edad Plioceno y gravas y arenas aluviales recientes (Hoyos y Velázquez, 1996; Gómez et al., 2015) (**Figura 1-4**).

De acuerdo a modelos geológicos elaborados para este cuerpo ultramáfico (Dueñas y Duque-Caro, 1981; López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996), éste se emplazó durante la orogenia pre-Andina (Eoceno Medio) y a partir de ese momento inició el proceso de laterización.

Dentro de los tres grandes tipos de depósitos de lateritas de níquel reconocidos (Silicato Mg-Ni hidratado, arcillas esmectíticas y oxi-hidróxidos de hierro) basado en la mineralogía de las fases principales que contienen la mena de Ni, la Ultramañita de Cerro Matoso ha sido clasificada como un depósito de tipo silicato hidratado (Brand, But & Elias, 1998; Gleeson, Butt & Elias, 2003; Freyssinet, But, Morris & Piantone, 2005; Proenza, 2015). El depósito se caracteriza por 1) el enriquecimiento de Ni dentro de la zona de saprolito, favorecido por el intenso fracturamiento de la roca, 2) evidencias de varios episodios de laterización en consecuencia de recurrentes eventos tectónicos que movilizaron bloques que promovieron la profundización del perfil de meteorización (López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996), 3) una muy buena exposición de la peridotita serpentizada y 4) un clima favorable para la laterización en un clima húmedo-seco tropical (Gleeson et al., 2003, 2004).

Figura 1-3. Contexto geológico regional y rasgos estructurales del área de estudio correspondientes a las Peridotitas de Planeta Rica y la Ultramafita de Cerro Matoso. Modificado de Geotec Ltda (2003); Guzmán et al. (2004); Gómez et al. (2015) y Mora et al. (2017).

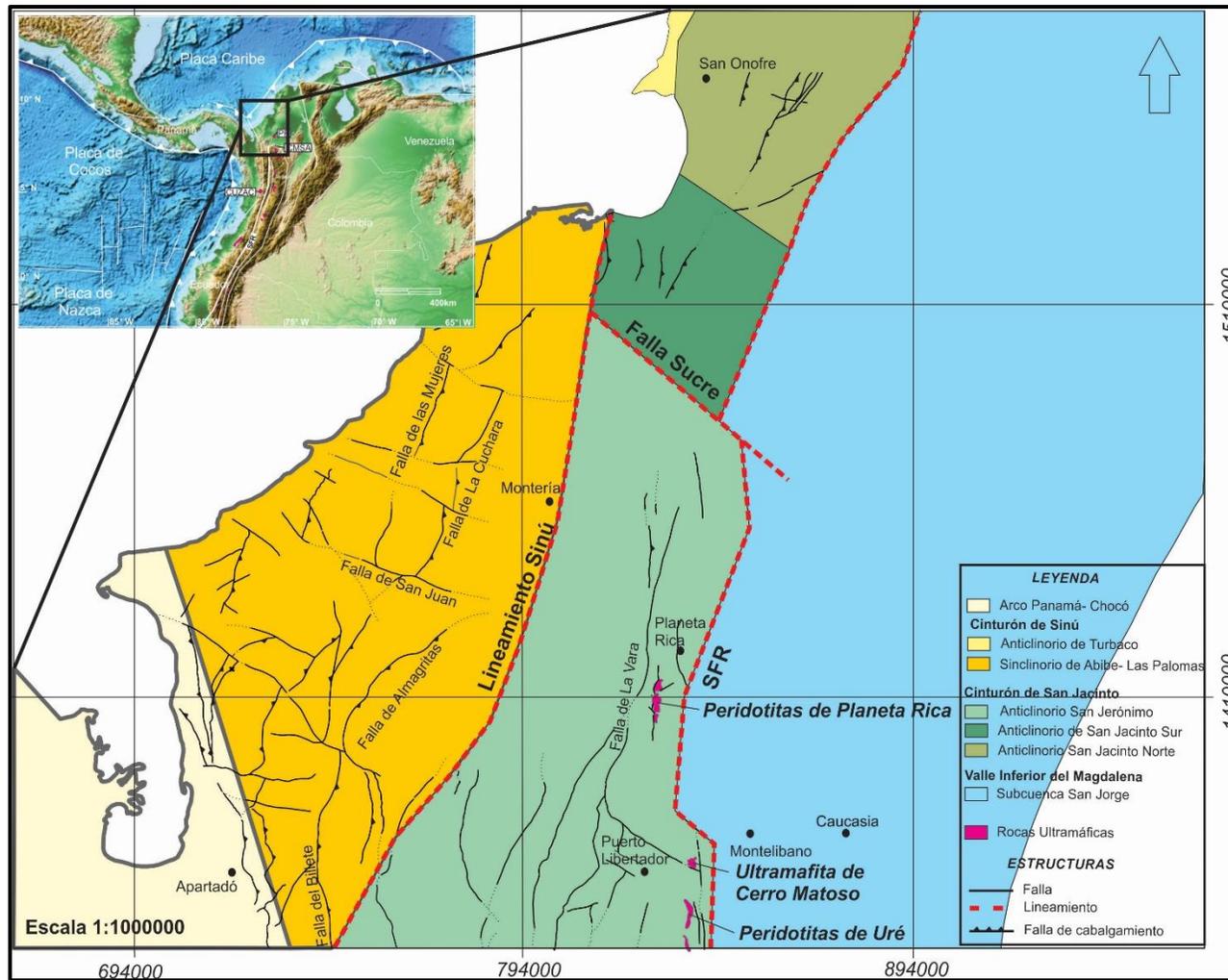
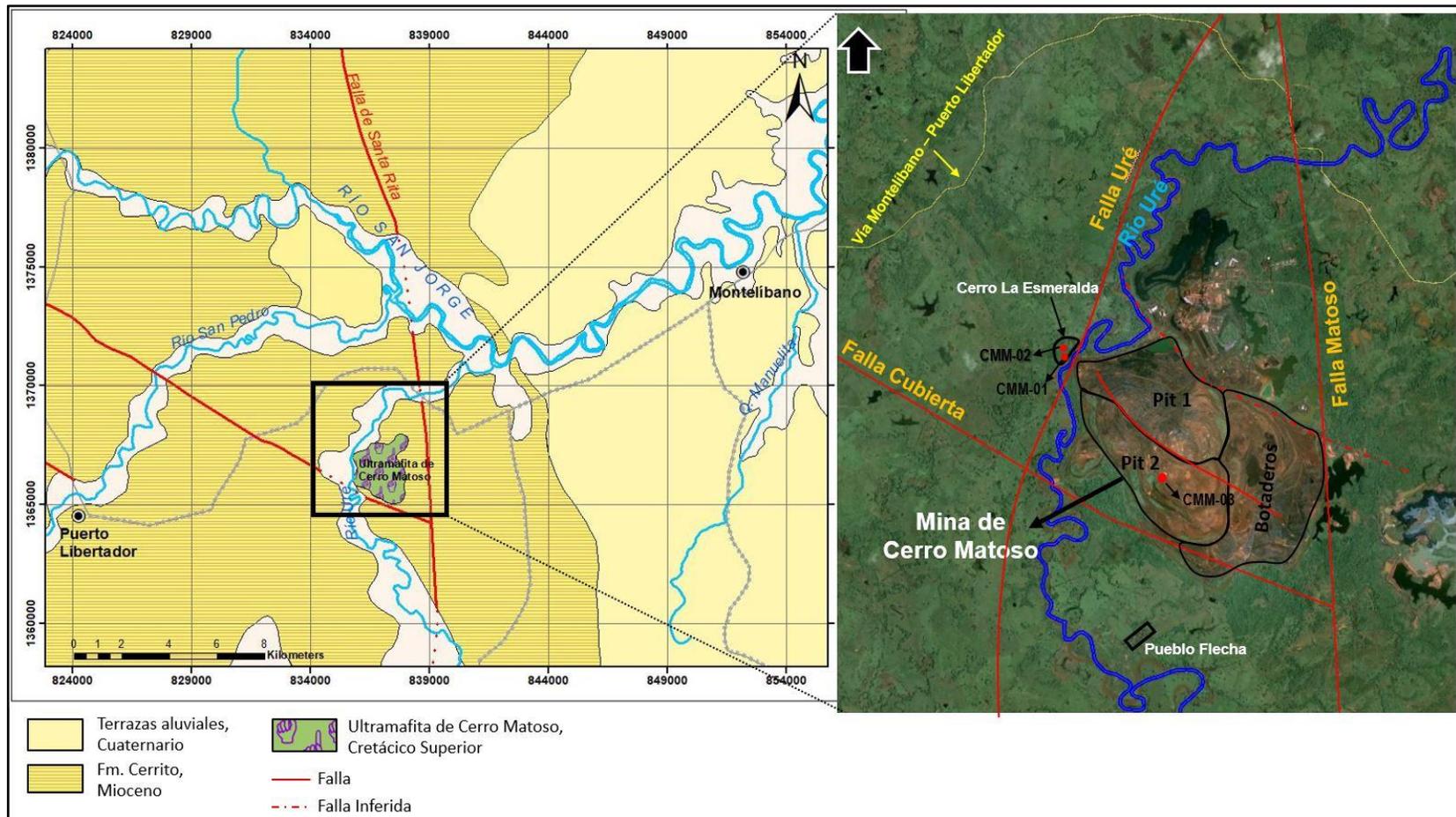


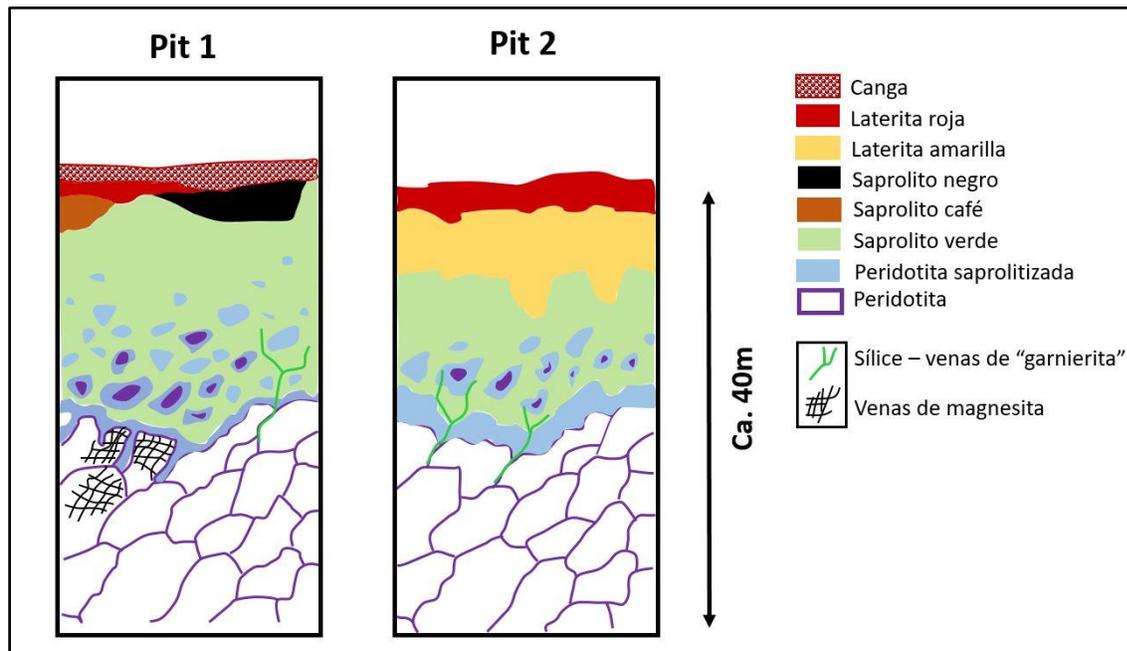
Figura 1-4. Ubicación de la Mina de Cerro Matoso y contexto geológico. Imagen izquierda: Mapa geológico local de Cerro Matoso, modificado de Gómez et al. (2015). Imagen derecha: Imagen satelital de Google Earth con detalle de la Mina de Cerro Matoso con ubicación de los puntos de muestreo del presente trabajo y ubicación aproximada de los pits de explotación y botaderos, modificado de Londoño y González (1997), Gleeson et al. (2004) y Gómez et al. (2015).



El perfil laterítico de Cerro Matoso (Gleeson et al., 2004) consiste, según nomenclatura del personal de la mina, de dos tipos de perfiles principales de cuerdo a su ubicación en la mina (**Figura 1-4** y **Figura 1-5**):

- **Pit 1 o bloque norte:** Cuerpo con el mayor grado de Ni concentrado en las fases sepiolita, serpentinas y silicatos hidratados de Ni. Está caracterizado por un nivel de canga (ferricreta magnética a no magnética) en el tope, le sigue laterita roja, saprolito negro, taquilita, saprolito verde, peridotita saprolitizada y peridotita.
- **Pit 2 o bloque suroeste:** El perfil de este pit está dominado por fases de óxido de hierro, minerales de arcilla y cuarzo, y concentraciones de Ni menores que en el pit 1. Está caracterizado por un perfil de tope a base de laterita roja, laterita amarilla, saprolito café, peridotita saprolitizada y peridotita.

Figura 1-5. Representación esquemática de los perfiles de meteorización de los Pit 1 y 2 en la Mina de Cerro Matoso. Modificado de Gleeson et al. (2004).



Ambos perfiles contienen venas de cuarzo y talco níquelífero (garnierita) a modo de texturas de “stockworks” o venas aisladas. La garnierita presenta muy altos contenidos de Ni (>30 wt%) (Gleeson et al., 2004).

De acuerdo a los análisis de DRX realizados por Gleeson et al., (2004), las fases minerales que caracterizan cada uno de los niveles anteriores corresponden a:

- **Canga:** Ferricreta magnética a no magnética, dominada por fases de óxido de Fe cristalino y amorfa, principalmente maghemita en la zona magnética.
- **Laterita roja:** Nivel muy rico en óxidos de Fe, principalmente goethita y esmectita.
- **Laterita amarilla:** Nivel de óxidos de Fe, gohetita y cuarzo.

- Saprolito café: Asociado a zonas de cizalla con alto contenido de sepiolita, serpentina y cuarzo.
- Taquilita: Término utilizado para describir un horizonte de fases amorfas y óxidos de hierro comúnmente asociado a zonas de falla al interior del depósito.
- Saprolito negro: Nivel asociado a taquilita y zonas de falla, dominado por óxidos de Fe, sepiolita, esmectita y cuarzo.
- Saprolito verde: Principal horizonte de la mena de níquel, dominado por sepiolita, pimelita, cuarzo, óxidos de Fe, serpentina rica en Ni, magnesita y siderita. También contiene numerosas venas de garnierita-cuarzo.
- Peridotita saprolitizada y peridotita: Olivino forsterítico, serpentina, enstatita y maghemita.

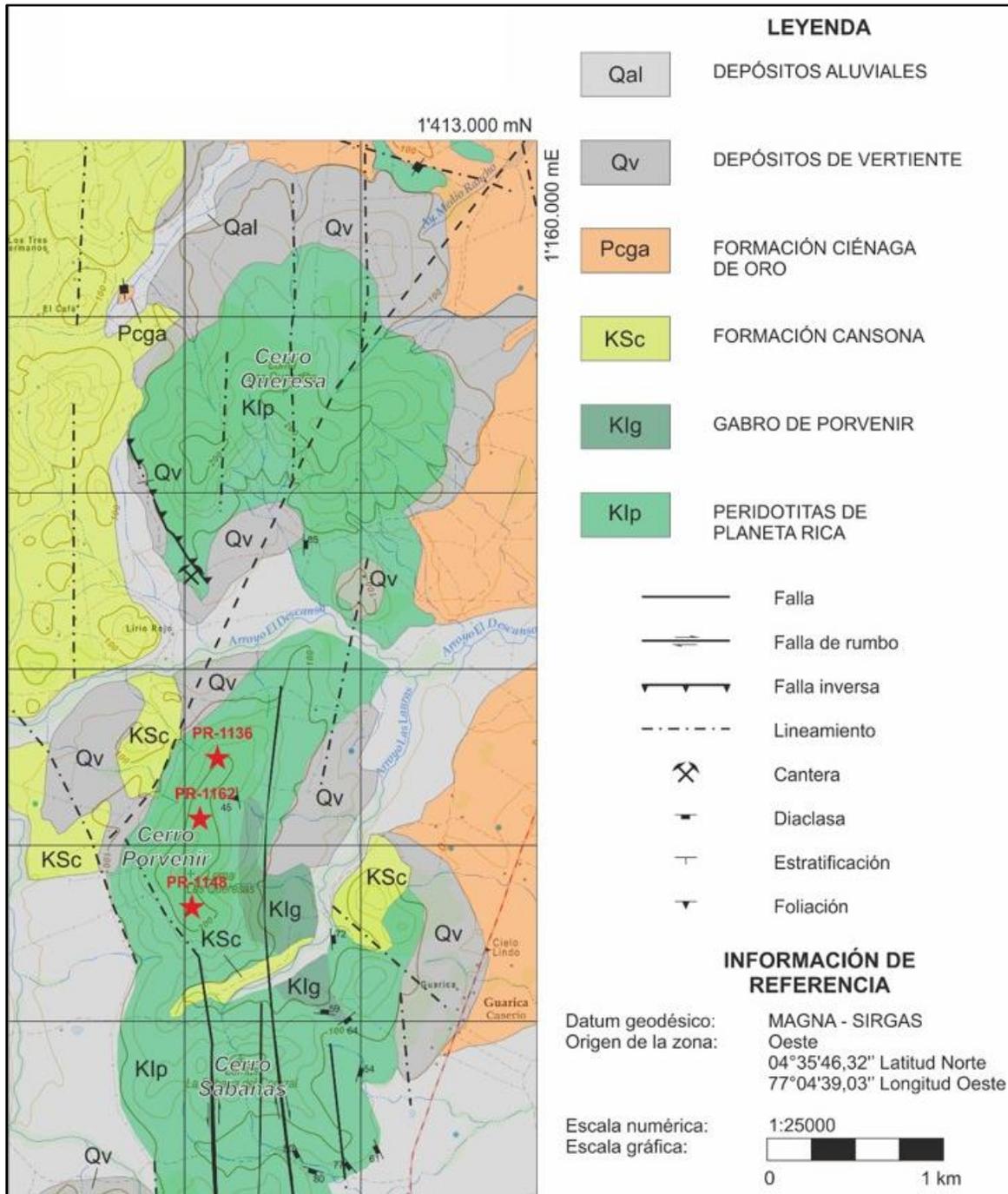
1.4.2 Peridotitas de Planeta Rica

Las Peridotitas de Planeta Rica son tres cerros aislados que conforman las lomas de Queresa, Porvenir y Sabana (Naciones Unidas, 1975) y están ubicados a unos 16 km al suroccidente del municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba. Se puede llegar a ellos siguiendo la vía que conduce de Planeta Rica hacia los caseríos de Medio Rancho y Marañonal.

Estas rocas corresponden a serpentinitas, serpentinitas foliadas y harzburgitas y tienen una geometría elongada de 10 km en sentido N-S. Están asociadas a gabros, andesitas porfídicas y basaltos intercalados con sedimentos marinos de la Fm. Cansona (Dueñas y Duque-Caro, 1981; González y Londoño, 2001; Ramírez, Tobón y Weber, 2017). Esta última, de edad Cretácico Superior (Duque, 1972), está constituida por una secuencia de chert a limolitas interestratificada con basaltos. Cerca de las peridotitas de Planeta Rica se encuentran los Basaltos de Nuevo Paraíso de composición toleítica e intercalaciones de diabasas y tobas, las cuales se considera que hacen parte de una secuencia ofiolítica desmembrada del cretácico similar a las de la Cordillera central (González y Londoño, 2001 y referencias contenidas).

Estas unidades son suprayacidas por sedimentos continentales de la Formación Ciénaga de Oro y depósitos de vertiente hacia la base de las tres lomas, con bloques centimétricos a métricos de canga provenientes de la erosión del perfil laterítico desarrollado en el cuerpo ultramáfico (Ramírez et al., 2017) y depósitos aluviales hacia los cauces activos (**Figura 1-6**).

Figura 1-6. Mapa geológico de Planeta Rica. En estrellas rojas, se observa la localización de los pozos de perforación muestreados en el presente trabajo. Modificado de Ramírez, 2018.



1.5 Metodología de trabajo

1.5.1 Trabajo de campo

Durante el trabajo de campo se muestrearon 3 perfiles expuestos en la mina de Cerro Matoso (en total 11 muestras de aprox. 3Kg con sus respectivos duplicados) y 3 pozos de perforación corazonada en el Cerro Porvenir de Planeta Rica (en total 26 muestras, con un diámetro de testigo de 2 ½" y un peso entre 1,1 Kg y 2,7Kg, ya que sólo se permitió, por parte de la empresa, tomar la mitad de los núcleos de perforación de cada pozo).

Selección y levantamiento de perfiles en la Mina de Cerro Matoso: Para realizar el muestreo, se analizaron varios sectores con las siguientes características: un punto que mostrara en lo posible la secuencia expuesta en superficie más completa del perfil actual de meteorización, otro punto que incluyera un nivel de material retrabajado (diferentes niveles del perfil de meteorización mezclados por efectos de transporte y depositación) y otro punto cuyo desarrollo del perfil fuese incompleto (presencia o no de saprolito) pero con un buen desarrollo del nivel limonítico y cuya ubicación fuese en una zona con el potencial más bajo de Ni dentro de la mina, con el objetivo de poder analizar el comportamiento de los EGP en diferentes sectores de la Mina.

La primera parte del muestreo se realizó en una colina contigua a la zona de extracción denominada Cerro Esmeralda y de la cual la empresa Cerro Matoso espera extraer material de producción de Ni en los próximos años (**Figura 1-4**). En enero de 2017 este cerro tenía la secuencia de laterización más completa de la ultramafita de Cerro Matoso, de acuerdo a los sondeos realizados por la empresa. Sin embargo, al momento del muestreo, el perfil completo no estaba totalmente expuesto en superficie por cuanto se optó por hacer dos perfiles sobre taludes expuestos, aprovechando los banqueros de hasta 2m de altura realizados por la empresa en este sector.

La segunda parte del muestreo se realizó en un área al SW de la Mina, contigua a la zona de botaderos.

Los 3 perfiles muestreados cumplen los siguientes parámetros escogidos para el muestreo de este trabajo:

- a) Secuencia expuesta en superficie más completa del perfil actual de meteorización: Laterita-saprolito-peridotita saprolitizada (Perfil denominado CMM-01).
- b) Secuencia con un nivel de material retrabajado: Material retrabajado-laterita-saprolito (Perfil denominado CMM-02).
- c) Secuencia con buen desarrollo de nivel limonítico y ubicado en zona de bajo Ni en la mina: Laterita-peridotita saprolitizada (Perfil denominado CMM-03).

Selección y levantamiento de perfiles en el Cerro Porvenir en Planeta Rica: La empresa South32 Ltd., inició en septiembre de 2016 una campaña de perforación diamantina en el denominado Cerro Porvenir que hace parte de las Peridotitas de Planeta Rica, con el fin de calcular reservas y definir su potencial niquelífero. La empresa proporcionó los núcleos de perforación diamantina de tres pozos ubicados de Sur a Norte en una distancia de 830 m aproximadamente (**Figura 1-6**), con el fin de obtener diferentes perfiles que representaran el perfil de meteorización del Cerro Porvenir en el sector más norte, central y sur del cerro.

Cada uno de los tres pozos perforados se llevó hasta una profundidad de 30 m, de manera tal que se garantizara llegar hasta la roca fresca. Los pozos seleccionados en el Cerro Porvenir fueron los siguientes:

- a) PR-1148: Ubicado en la parte sur del cerro.
- b) PR-1162: Ubicado en la parte central del cerro.
- c) PR-1136: Ubicado en la parte norte del cerro.

1.5.2 Selección de muestras para análisis químico y petrográfico

Selección de muestras para análisis químico: De los 6 perfiles muestreados durante la etapa de campo, se seleccionaron 3 perfiles de suelos: dos de Cerro Matoso y un perfil completo de un pozo de perforación del área de Planeta Rica. Los perfiles seleccionados fueron: CMM-01 (con 3 muestras), CMM-03 (con 5 muestras) y PR-1136 (con 9 muestras), para un total de 17 muestras para análisis químicos de elementos mayores, menores, trazas, EGP y Au.

El criterio de selección de las muestras para análisis geoquímico se basó en las características descritas en campo:

1. En Cerro Matoso: Dado que en Cerro Matoso el número de niveles muestreados por perfil eran menores a los de uno solo en Planeta Rica, se decidió realizar análisis químico a 2 de los 3 perfiles: CMM-01 y CMM-3, con un total de 8 muestras entre los dos. Se decidió omitir el perfil CMM-02, ya que el nivel de interés (sector limonítico) no era claro debido a la presencia de un material retrabajado que lo enmascaraba y en caso de que correspondiera a un intervalo de laterita, era demasiado delgado (~15cm respecto a los demás perfiles muestreados en Cerro Matoso (más detalle en el subcapítulo 2.1)).
2. En Planeta Rica: De los tres perfiles muestreados allí, se escogió el perfil PR-1136 con un total de 9 muestras, ya que corresponde a un perfil completo y con desarrollo de laterita más grueso (más detalle en el subcapítulo 2.2).

Selección de muestras para análisis petrográfico: Dos muestras de la roca fresca a ligeramente meteorizada de los perfiles CMM-03 (de Cerro Matoso) y PR-1136 (de Planeta Rica) fueron seleccionados para análisis microscópico, en base a que fueron estos perfiles dos de los tres seleccionados para análisis geoquímico de elementos mayores, menores y

contenido de EGP. De manera adicional, se quería verificar si hay diferencias texturales y mineralógicas entre las rocas ultramáficas de estas dos áreas.

Las muestras de roca seleccionadas fueron la CMM-03-3 del área del Pit 2 en Cerro Matoso y la muestra PR-1136-2 del Cerro Porvenir en Planeta Rica.

1.5.3 Análisis petrográfico

Se elaboraron 2 secciones delgadas pulidas correspondientes a muestras de la roca fresca a ligeramente meteorizada de los perfiles CMM-03 y PR-1136, que fueron seleccionados para análisis microscópico. Las muestras fueron analizadas en un microscopio óptico Olympus Modelo BX-43 de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y un microscopio óptico Olympus un Modelo BX53M del Servicio Geológico Colombiano, Medellín - Colombia (**Figura 1-7**)

Figura 1-7. Imágenes del microscopio óptico marca Olympus Modelo BX53M.



1.5.4 Análisis geoquímico

Los métodos analíticos utilizados fueron: 1) Fluorescencia de Rayos X para la caracterización química de elementos mayores, menores y trazas en lateritas de Ni y 2) ensayo al fuego de sulfuro de Ni para concentrar Au y EGP. Los análisis químicos fueron realizados en **Intertek Genalysis Ltd.**, Perth (Australia).

Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX): Las muestras pulverizadas se fusionan con un flujo de borato de litio y se moldean en discos utilizando tecnología semiautomática o totalmente automática. Se producen datos utilizando instrumentación dispersiva de longitud de onda simultánea o secuencial. La pérdida por ignición (LOI) se determina mediante el uso de análisis termogravimétrico (TGA). El punto único de LOI se determina a 1000° C.

Ensayo al fuego de sulfuro de Ni: Análisis diseñado para recuperar oro y todos los elementos del grupo del platino como un residuo que se filtra, se disuelve en agua regia y se lee en un ICP-MS para límites de detección por debajo ppb, siguiendo el método descrito por Chan & Finch (2001). El límite de detección de los elementos Pt, Pd, Rh, Ru, Ir y Os fue de 1ppb y 2ppb para Au.

1.5.5 Concentración de minerales pesados

La obtención de MGP en muestras cuyos contenidos de EGP son muy bajos, del orden de ppb y con tamaños de grano $<40 \mu\text{m}$ es muy difícil de concentrar por métodos tradicionales (Aiglsperger, Proenza, Zaccarini, Labrador y Navarro-Ciurana, 2011; Navarro-Ciurana, Aiglsperger y Proenza, 2012) como: trituración, tamizaje, separación magnética y separación por líquidos densos. En la última década se ha estado utilizado una técnica muy efectiva de concentración no química de minerales pesados, denominada “Hidroseparación” la cual permite el procesamiento de muestras como las lateritas y ha tenido resultados exitosos en la obtención de MGP en muestras de lateritas que contienen EGP en República Dominicana y Cuba (Aiglsperger et al., 2011; Navarro-Ciurana et al., 2012).

El presente trabajo realizó una separación por el método de hidroseparación, llevada a cabo en el laboratorio HS 11 de la Universidad de Barcelona, España.

Selección de la muestra: El criterio de selección de la muestra a la cual se le haría el proceso de concentración de minerales pesados por medio de la técnica de hidroseparación fue con base en los resultados de análisis químicos de las muestras de los tres perfiles lateríticos (CMM-01, CMM-03 y PR-1136), para lo cual se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- 1) Tomar el intervalo del perfil con el mayor contenido total de EGP, ya que correspondería al intervalo con mayor probabilidad para encontrar MGP, teniendo en cuenta que la concentración de EGP está por el orden de ppb.
- 2) Alto contenido de MnO y Co_3O_4 , ya que el Mn y el Co parecen tener una correspondencia con las zonas de acumulación de EGP según análisis de Aiglsperger et al., (2016).
- 3) La cantidad de muestra, en lo posible mayor a 2,7 kg, considerando la baja concentración de EGP (por el orden de ppb), (Navarro-Ciurana et al., 2012).

Se seleccionó la muestra **PR-1136-SC** con un peso de 1,1 kg¹ ubicada en la zona de transición entre el horizonte limonítico y el saprolítico del perfil PR-1136 de Planeta Rica (detalle de la muestra seleccionada en el capítulo 5).

¹ El peso de la muestra PR-1136-SC fue de 1,1 kg, por ser una muestra de un núcleo de perforación proporcionado por la empresa South32 Ltd. La empresa tan sólo permitió muestrear la mitad de cada intervalo seleccionado.

Sin embargo, se descartó la posibilidad de realizar la caracterización mineralógica de los EGP de alguno de los intervalos del perfil laterítico de Cerro Esmeralda (CMM-01), porque mostraron los contenidos de EGP más bajos de todas las muestras analizadas (50% por debajo de los valores encontrados en los demás intervalos muestreados), y por ende la probabilidad de encontrar MGP en dichas muestras es muy baja. Además, el proceso mismo de preparación de la muestra por tamizado húmedo, baño ultrasónico e hidroseparación, son técnicas de alto consumo de tiempo.

Preparación de la muestra: Se realizaron etapas del proceso de preparación de la muestra PR-1136-SC previo a la aplicación de la técnica de hidroseparación, que se describen a continuación:

a. Se tomaron pequeñas porciones de aproximadamente 12g de la muestra PR-1136-SC para un proceso inicial de tamizado manual en húmedo (agua) a través de series de tamizados estándar de 125, 100, 75, 50, 30 y <30 μm (**Figura 1-8**). El paso de un tamiz a otro se da cuando la cantidad de partículas o granos negros es mayor a los rojos, o cuando por tacto se detecta más homogéneo. Este procedimiento de tamizar 12g por una columna de tamices se realizó en un tiempo aproximado de 15 minutos.

Figura 1-8. Proceso de tamizado en húmedo para una porción de la muestra PR-1136-SC.

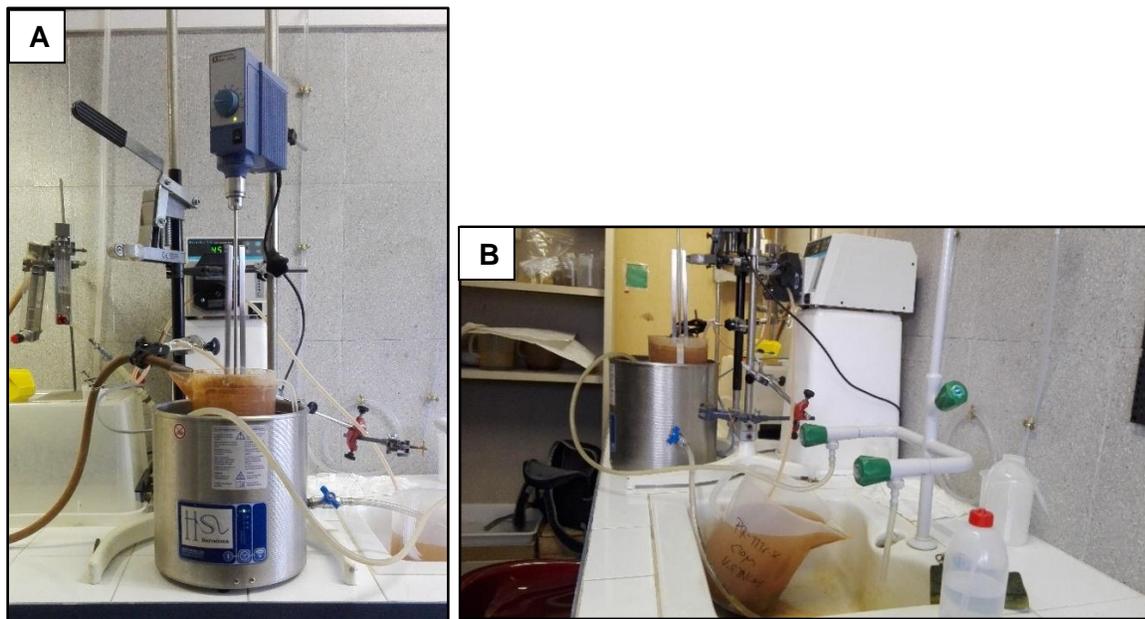


b. Para la pre-concentración, cada fracción obtenida del tamizado en húmedo (125, 100, 75, 50, 30 y <30 μm) se depositó en recipientes de 250 ml. Cada fracción se sometió a un baño de ultrasonido a una frecuencia entre 37 y 42 KHz, con el fin de remover el exceso de livianos y facilitar el proceso de hidroseparación, así, los minerales pequeños y menos densos se fueron decantando como colas (**Figura 1-9**). Dependiendo de la composición inicial de la suspensión, este procedimiento tuvo que repetirse tantas veces fuese necesario, con agua añadida después de cada decantación hasta que el resto del lodo estuviese compuesto principalmente de fases minerales típicamente de color oscuro y pesado.

Para las fracciones grandes, mayores a 50 μm , el tiempo en el baño de ultrasonido fue de hasta 10 minutos, sin embargo, para las fracciones < 50 μm el tiempo fue de hasta 3 días.

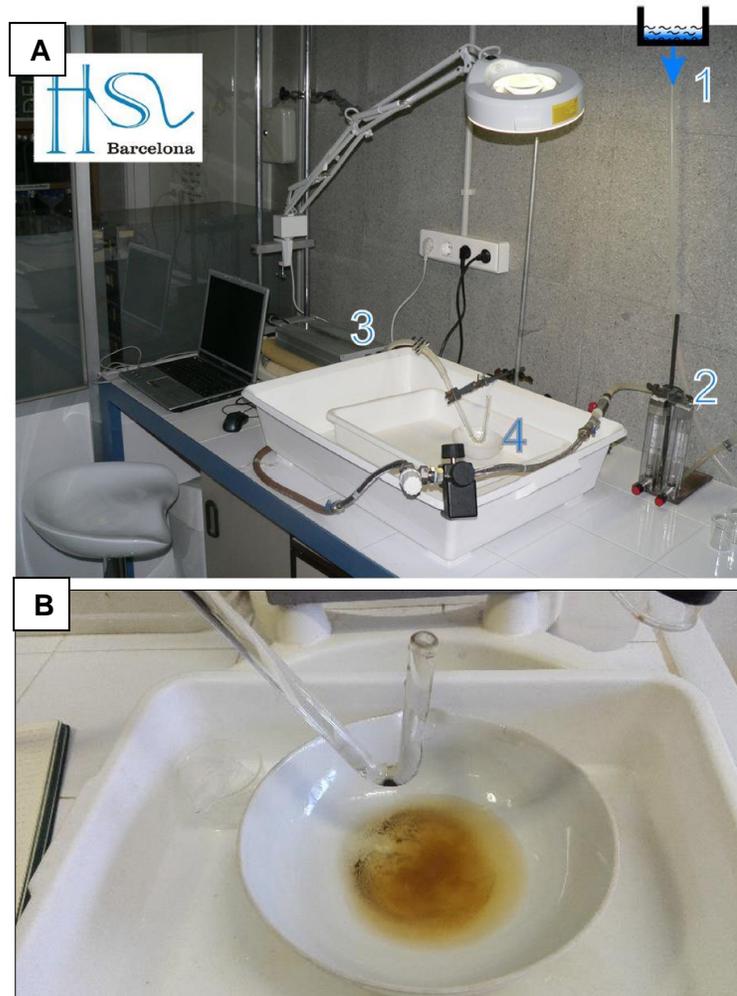
Los productos de concentración ultrasónica resultaron en una distribución de 6 fracciones de tamaños, así: >125, 100-125, 75-100, 50-75, 50-30 y <30 μm .

Figura 1-9. Baño de ultrasonido. **A.** Equipo de baño de ultrasonido y **B.** Muestra del proceso de pre-concentración de la fracción <math><30\ \mu\text{m}</math>.



Método de hidroseparación para concentración de minerales pesados: Consiste en “simular depósitos de placer por combinación de un flujo de agua laminar a presión constante con diversos impulsos de onda y las fases minerales pesadas de orden micrométrico (e.g. oro, minerales del grupo del platino, circones) son concentrados y llevados a monolayers pulidos para su subsecuente investigación” (Tomado de <http://www.hslab-barcelona.com>). Detalles técnicos del proceso son explicados por Aiglsperger et al. (2011) y <http://www.cnt-mc.ru/services/hs.html>.

Figura 1-10. Hidroseparatoración. **A.** Laboratorio de Hidroseparatoración de la Universidad de Barcelona: 1. Tanque de agua, 2. Medidores de flujo, 3. Dispositivo HS-11 controlado por software y 4. Tubo de separación de vidrio. (Tomado de Aiglsperger et al. (2015) y **B.** Proceso de concentración de minerales densos.



1.5.6 Técnica para la caracterización mineralógica de minerales pesados

SEM-EDS: Los concentrados de minerales pesados resultantes se montaron en monolayers de resina pulidos y posteriormente se investigaron mediante microscopía de luz reflejada y mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un Quanta 200 FEI XTE 325 / D8395, equipado un sistema de 250 microanálisis con espectrómetro dispersivo de energía INCA (EDS), a unas condiciones de funcionamiento de 20kV y 5nA. Además, utilizando un microscopio electrónico de escaneo de emisión de campo (FE-SEM) JEOL JSM-7100 en el Serveis Científics i Tecnològics, Universidad de Barcelona, España (**Figura 1-11**).

Figura 1-11. Equipo SEM-EDS de la Universidad de Barcelona, España.



1.5.7 Creación de un Semillero de Investigación Estudiantil

A fin de fortalecer la línea de investigación en EGP en Colombia, se creó el grupo “Semillero estudiantil en Metalogía de Rocas Ultramáficas (SEMERU)” con apoyo de la Universidad Nacional de Colombia, mediante la Convocatoria Nacional de Proyectos para el Fortalecimiento de la Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2016-2018.

SEMERU fue creado en Septiembre de 2016 y contó con la participación de 8 estudiantes de pregrado de ingeniería geológica, la tutoría de la docente Marion Weber y Mónica Tobón. En el **Anexo 1** se allegan evidencias de las actividades realizadas que corresponden a:

- Reuniones mensuales, a las que se llevaron profesionales expertos en la industria minera, se discutieron artículos y por parte de los estudiantes se prepararon presentaciones acerca del platino y los diferentes tipos de depósitos de Ni-Co alrededor del mundo.
- Se vinculó a Carlos Ramírez, estudiante del programa curricular de Ingeniería Geológica, para realizar la cartografía de las rocas ultramáficas de Planeta Rica y unidades geológicas asociadas, como parte de su Trabajo Dirigido de Grado. Durante las campañas de campo realizadas recibió el apoyo de los integrantes de SEMERU.
- En 2016, se organizó la charla “Cinturón plegado de San Jacinto. Contexto geotectónico de cuerpos ultramáficos” dictada por el geólogo Jorge Ariel García, consultor de la empresa Geoambar.

- En 2017, se organizó el curso “Metalogenia de Ofiolitas” dirigido por los doctores Joaquín Proenza y Thomas Aislperger de la Universidad de Barcelona, España y también se organizó una charla magistral denominada “The 3.5 Ga Sao Tomé layered mafic-ultramafic intrusión, NE Brazil: Insights into a Paleoarchean Fe-Ti-V oxide mineralization and its reworking during West Gondwana assembly” dictada por el MSc. Felipe Velásquez.
- El proceso de preparación de la muestra y aplicación de la técnica de hidroseparación fueron realizados por Sebastián Betancur, estudiante de pregrado del programa curricular de Ingeniería Geológica e integrante del SEMERU, quien, con la supervisión de los doctores Joaquín Proenza y Thomas Aiglsperger y las estudiantes de doctorado Júlia Farré y Nuria Pujól, obtuvo el conjunto de fracciones de concentrados de minerales pesados indispensables para este proyecto.
- Los análisis SEM y de Microsonda Electrónica, fueron realizados en apoyo de los doctores Joaquín Proenza y Thomas Aiglsperger de la Universidad de Barcelona.

2. Capítulo 2: Trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló en Enero de 2017 y se logró en gran medida gracias a la buena disponibilidad de las directivas de la empresa South32 Ltd., quien opera la Mina de Cerro Matoso S.A. La empresa proporcionó los permisos y acompañamiento para realizar el muestreo en los diferentes lugares seleccionados.

2.1 Mina de Cerro Matoso S.A (CMSA)

El trabajo de muestreo al interior de la Mina de Cerro Matoso tuvo dificultades, dado que no fue fácil encontrar un buen lugar de muestreo que representara el perfil de meteorización del cuerpo ultramáfico, ya que el nivel de extracción en los últimos 35 años ha sido muy intensivo y por tanto hoy en día no es posible encontrar todos los niveles del perfil de meteorización reportados en trabajos anteriores (López-Rendón, 1986; Hoyos y Velázquez, 1996; Gleeson et al., 2004). En la actualidad los perfiles tienen en promedio 10 m de espesor y la secuencia más común es:

- Laterita – saprolito verde – peridotita saprolitizada - peridotita
- Saprolito verde - peridotita saprolitizada – peridotita
- Laterita - peridotita saprolitizada - peridotita
- Peridotita fresca.

Por otra parte, una de las dificultades presentadas para realizar el muestreo fue tratar de encontrar sitios con taludes no mayores a 1,5 m en la mina, que por cuestiones de seguridad, son inaccesibles para visitantes (considerado trabajo en alturas especializado).

2.1.1 Muestreo

Se seleccionaron tres puntos de muestreo (perfiles expuestos) en la **Mina de Cerro Matoso S.A.** Dos de los puntos se realizaron en Cerro Esmeralda ubicado al NNW de la zona de extracción, contiguo al Río Uré y el otro punto de muestreo fue ubicado al SW de la zona de extracción de la mina, que corresponde al Banco 154 del Pit 2 (**Figura 1-4 y Tabla 2-1**).

Tabla 2-1. Coordenadas de ubicación de los perfiles muestreados en la Mina de Cerro Matoso S.A

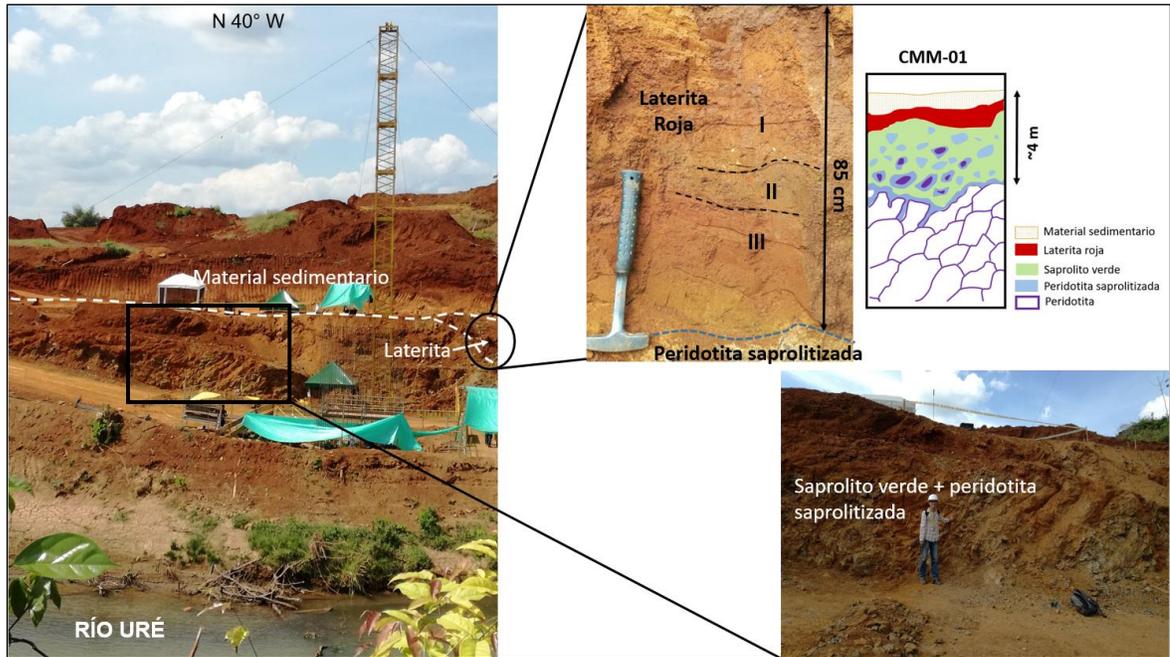
Coordenadas Planas / Geográficas Cerro Matoso (CMSA)	Puntos de Recolección de Muestras	Coordenada X /Longitud:	Coordenada Y /Latitud:	Z (m.s.n.m):
Proyección: Magna Sirgas - Colombia Bogotá / Magna Sirgas Geográficas	CMM-01 (Cerro Esmeralda-CMSA)	835.765,874 / 75°34'0,4''	1.367.205,035/ 07°54'50,5''	79
	CMM-02 (Cerro Esmeralda-CMSA)	835.720,168 / 75°34'1,9''	1.367.275,881/ 07°54'52,8''	103
	CMM-03 (Banco 154 Pit 2-CMSA)	837.010,903 / 75°33'19,6''	1.365.774,667/ 07°54'4,1''	

Perfil CMM-01: Ubicado al costado SW del Cerro Esmeralda, contiguo al Río Uré (**Figura 1-4**). Se tomaron 3 muestras de aproximadamente 3Kg con sus duplicados, correspondiente a: una muestra de laterita roja, una muestra de saprolito verde y una muestra de peridotita saprolitizada (**Tabla 2-2** y **Figura 2-1**).

Tabla 2-2. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-01.

Perfil CMM-01					
Clasificación	Intervalo profundidad (m)	Espesor (m)		Color	Características
Material Sedimentario	0 - 1,50	1,50		Amarillo	Arena gravosa media a gruesa.
Laterita Roja	1,50 - 2,30	I	0,30	Rojo	Textura limoarcillosa, pocas manchas de tamaño mediano, estructura en bloques subangulares finos a medianos. Tiene raíces milimétricas y alargadas.
		II	0,10	Amarillo rojizo	
		III	0,40	Café rojizo oscuro	
Saprolito verde	2,30 - 3,5	1,2		Amarillo verdoso	Saprolito de peridotita con bastita a partir de piroxeno y granos de cromita milimétrica diseminada.
Peridotita saprolitizada	3,50 en adelante			Verde parduzco	Peridotita saprolitizada con manchas grisáceas, muy fracturada, serpentizada.

Figura 2-1. Vista del afloramiento CMM-01 en el Cerro Esmeralda y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.



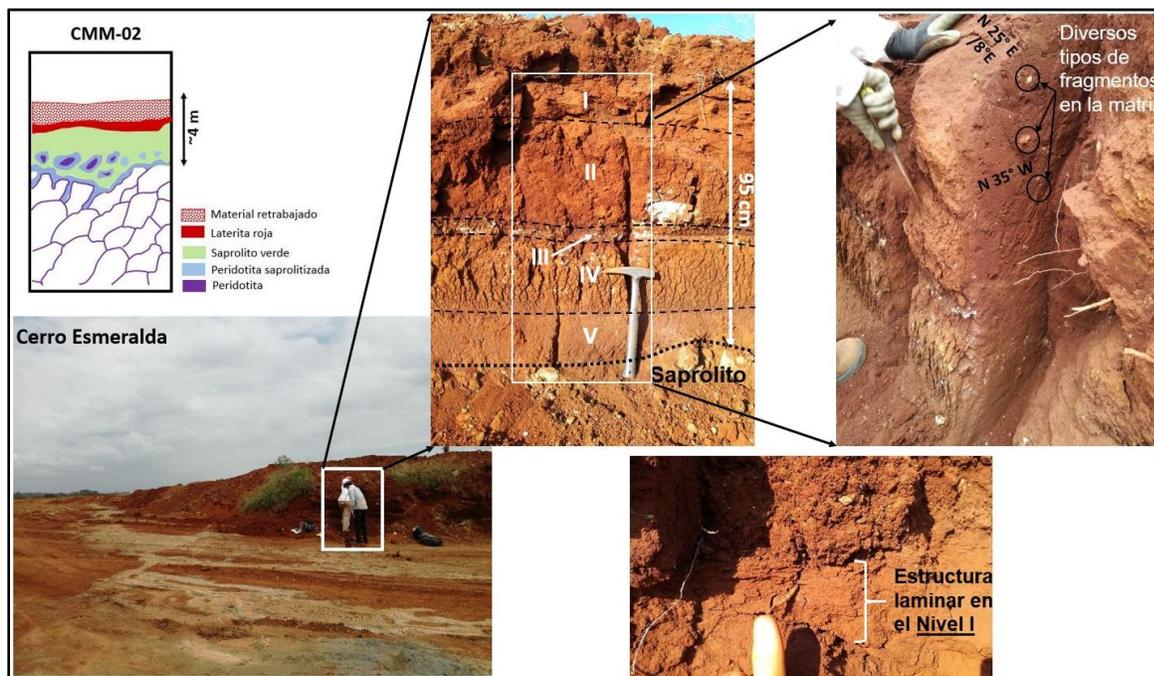
Perfil CMM-02: Ubicado en el tope del Cerro Esmeralda (**Figura 1-4**). Se tomaron 3 muestras de aproximadamente 3Kg con sus respectivos duplicados, correspondiente a: 2 muestras de material retrabajado (mezcla de los niveles I y II como tope del perfil y mezcla de los niveles IV y V como base) y una muestra de saprolito verde in situ (**Tabla 2-3** y **Figura 2-2**).

Tabla 2-3. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-02.

Perfil CMM-02					
Clasificación	Intervalo profundidad (m)	Espesor (m)		Color	Características
Material retrabajado	0 - 0,10	I	0,10	Café rojizo	Textura limosa, consistencia dura y compacta y los primeros 5cm de tope a base presentan una estructura laminar (podría estar relacionado a compactación por maquinaria en la zona).
	0,1 - 0,45	II	0,35	Café rojizo	Textura limosa, consistencia dura y compacta. Tiene fragmentos de tamaño grueso a fino (< 5%) correspondientes a saprolito verde de la peridotita, cuarzo anguloso, restos de carbón y raíces milimétricas y alargadas.
	0,45 - 0,53	III	0,08	Rojo	Línea muy marcada por fragmentos muy gruesos de una arenisca cuarzosa fina con matriz negra.

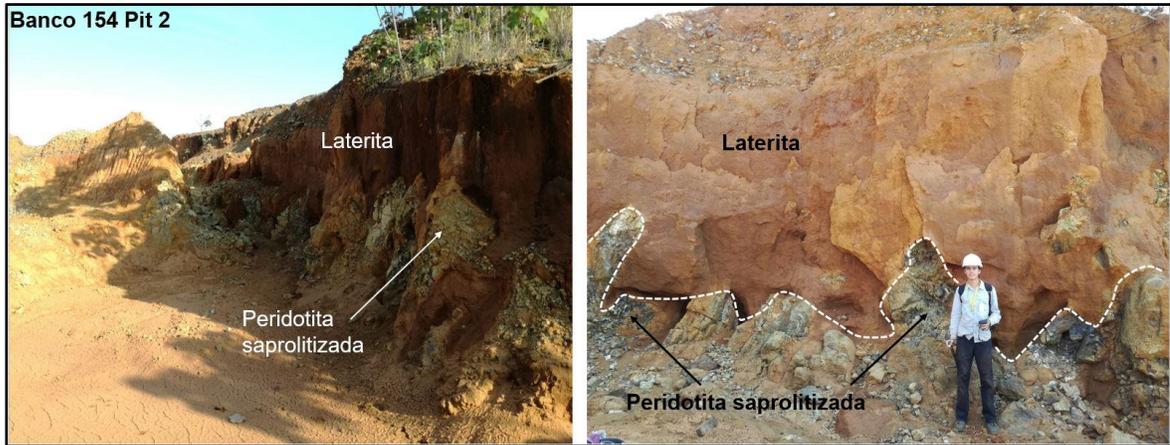
	0,53 – 0,80	IV	0,27	Rojo	Textura limosa, consistencia dura, moderadamente compacta, pocas manchas medianas a pequeñas y difusas con una coloración rojo oscuro. Estructura columnar muy fina. Tiene aprox. 15% de fragmentos finos a medianos correspondientes a óxidos de hierro (hematita), saprolito verde y cuarzo blanco lechoso con tamaño centimétrico de hasta 7 cm. También hay restos de raíces milimétricas.
Laterita Roja ?	0,80 – 0,95	V	0,15	Café rojizo oscuro	Probable nivel de laterita roja. La textura es limo arcillosa, estructura en bloques angulares a subangulares finos. Este nivel presenta porosidad milimétrica y un porcentaje menor al 10% de fragmentos angulares finos de orden milimétrico correspondientes a óxidos de hierro. La transición del nivel IV al nivel V es difuso y se presume que este nivel corresponde a laterita roja porque no hay fragmentos de otras composiciones como en los niveles superiores.
Saprolito verde	0,95 en adelante			Verde amarillento	Saprolito de peridotita, finogranular, muy compacta y moderadamente frágil. Se forman costras de óxidos de hierro por los planos de fractura. Granos de cromita negra milimétrica diseminada.

Figura 2-2. Vista del afloramiento CMM-02 en el tope del Cerro Esmeralda y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.



Perfil CMM-03: Ubicado en el Banco 154 del Pit 2, al SW de la zona de extracción de Cerro Matoso (**Figura 1-4**). Esta área se caracteriza por tener un perfil de meteorización inmaduro ya que se desarrolla una laterita de poco espesor (de 2m a 4m) y pasa a la roca que se encuentra ligeramente meteorizada o serpentinizada sin desarrollar un nivel de saprolito (**Figura 2-3**).

Figura 2-3. Perfil de meteorización inmaduro (laterita + peridotita) presente en el Banco 154 del Pit 2, al interior de la Mina de Cerro Matoso.



El punto de muestreo se dividió en cinco niveles por sus cambios en color y rasgos físicos especiales. Los cuatro niveles de tope a base corresponden a una laterita que varía de un color café rojizo oscuro a amarillo rojizo, los cuales se encuentran en contacto directo con una peridotita saprolitizada (**Tabla 2-4** y **Figura 2-4**). El nivel III se separó de los demás niveles por la presencia de fragmentos silíceos en dicho segmento y el nivel I por ser el área de transición de la laterita a la roca.

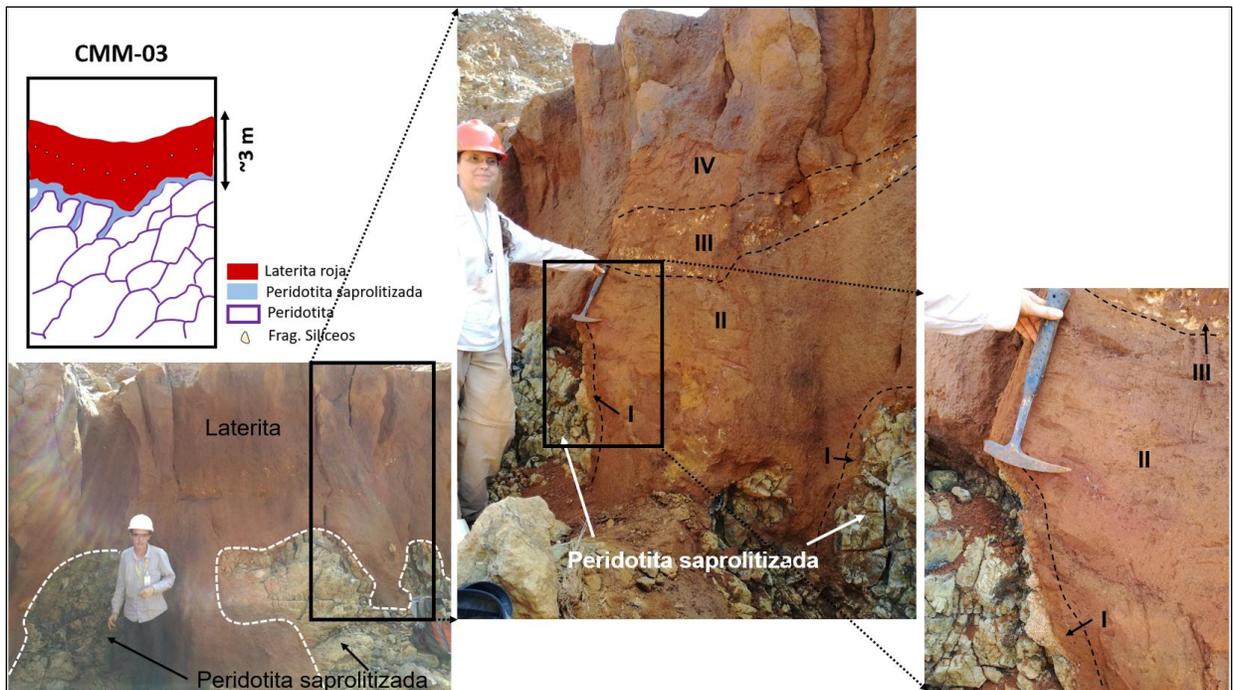
Se tomaron 5 muestras: una de cada nivel y una muestra de la peridotita saprolitizada, cada una con sus respectivos duplicados. Cada muestra pesaba aproximadamente 3Kg.

Tabla 2-4. Descripción de las características físicas de los niveles del perfil de meteorización CMM-03.

Perfil CMM-03					
Clasificación	Intervalo profundidad (m)	Espesor (m)		Color	Características
Laterita Roja	0 - 0,8	IV	0,8	Café rojizo oscuro	Textura arcillo limosa, porosa, muy dura y compacta, estructura en bloques subangulares medianos a finos y con restos de raíces milimétricas.

	0,8 - 1,0	III	0,2	Amarillo	Sector de fragmentos silíceos con formas subangulares de color crema con un tamaño de hasta 5cm.
	1,0 - 2,0	II	1,0	Rojo amarillento	Textura limo arcillosa, muy porosa, de muy fácil disgregación, presenta pocas manchas medianas a grandes bien definidas con una coloración café fuerte. Se observan algunos fragmentos de peridotita saprolitizada subangular de orden centimétrico.
	2,0 - 2,1	I	0,1	Rojo amarillento	Textura limo arcillosa, muy porosa, de muy fácil disgregación y presencia de raíces milimétricas. Se encuentra en contacto directo con la peridotita saprolitizada.
Peridotita saprolitizada	2,1 en adelante			Verde parduzco	Roca serpentinizada, muy dura y compacta, presenta una costra de coloración verde amarillenta con varios cristales de cromita negra (i.e., picotita).

Figura 2-4. Vista del afloramiento CMM-03 en el Banco 154 del Pi 2 y detalle del perfil de meteorización en la estación de muestreo.



2.2 Planeta Rica

Los tres pozos perforados en el Cerro Porvenir están ubicados a 16 Km aproximadamente hacia el SW del municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba (**Tabla 2-5 y Figura 1-6**), sobre la vía que conduce de Planeta Rica hacia los caceríos de Medio Rancho y Marañonal. Aproximadamente a 1 Km después de pasar el cacerío de Marañonal y luego a unos 100 m de la finca San Juan de Potosí hay un desvío a mano derecha de 1 km aproximadamente y cuyo camino conduce a los cerros de Porvenir y Queresas (**Figura 2-5 y Figura 2-6**).

Tabla 2-5. Coordenadas de ubicación de los pozos de perforación muestreados en el Cerro Porvenir por parte de la empresa South32 Ltd.

Coordenadas Planas / Geográficas Planeta Rica	Pozo de perforación	Coordenada X /Longitud:	Coordenada Y /Latitud:	Z (m.s.n.m):
<i>Proyección:</i> Magna Sirgas -Colombia Bogotá / Magna Sirgas Geográficas	PR-1148 (parte sur del Cerro Porvenir)	827.516,63 / 75°38'34,84''	1.408.698,3 / 08°17'19,65''	224,6
	PR-1162 (parte central del Cerro Porvenir)	827.615 / 75°38'31,70''	1.409.250 / 08°17'37,611''	
	PR-1136 (parte norte del Cerro Porvenir)	827.662,57 / 75°38'30,185''	1.409.550,1 / 08°17'47,38''	173,89

Figura 2-5. Vista Panorámica del Cerro Porvenir y ubicación de los 3 pozos perforados y muestreados.

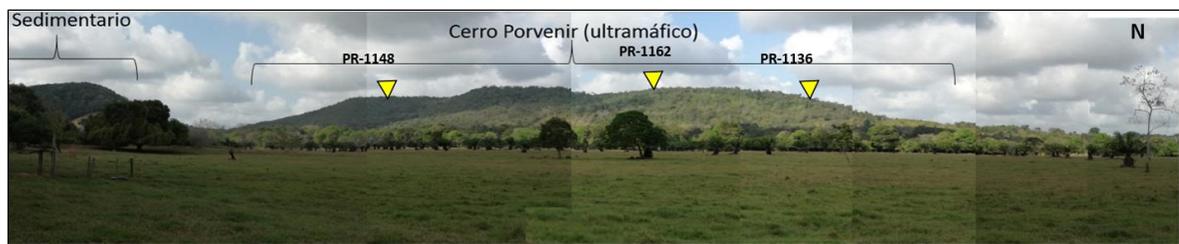
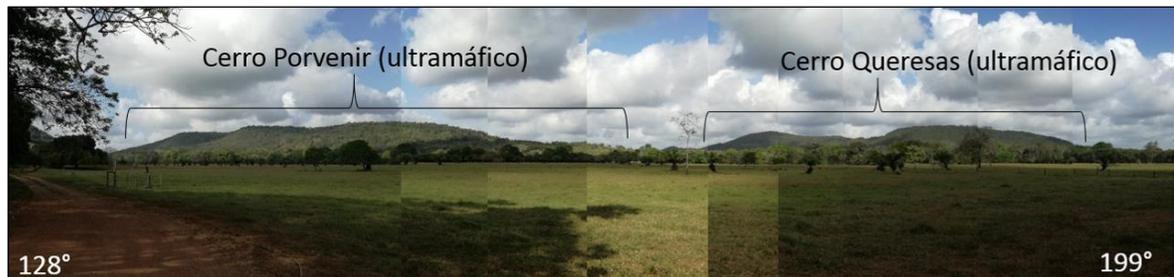


Figura 2-6. Vista Panorámica de los Cerro Porvenir y Queresas.



2.2.1 Muestreo

Las características físicas generales de los niveles de meteorización de la Peridotita de Planeta Rica, de acuerdo a lo observado en los 3 pozos perforados (PR-1148, PR-1162 y PR-1136) se consigna en la **Tabla 2-6**.

Tabla 2-6. Características físicas generales de los niveles de meteorización de la Peridotita de Planeta Rica.

Clasificación	Espesor promedio (m)	Color	Características
Canga (duricrust)	0,5 - 2,0	Café rojizo oscuro a café muy oscuro	Canga fuertemente magnética, muy dura y muy compacta, con manchas frecuentes de medianas a grandes de colores que varían de café fuerte a rojo amarillento, siendo indistintas y netas. La nitidez es difusa. Está constituido principalmente por óxidos de hierro como goethita, hematita y magnetita.
Laterita Roja	0,5 - 4,0	Rojo oscuro	Laterita moderadamente magnética, dura y compacta, deleznable con textura terrosa. Muestra manchas frecuentes pequeñas a grandes de color café fuerte que disminuyen hacia la base. Contraste definido que varía de destacado a difuso, límites netos a difusos. La estructura se presenta entre granular y en bloques muy finos angulares a subangulares. Contiene raíces milimétricas y fragmentos de óxidos de hierro duros, es porosa alargada alrededor del 10%. Tiene parches negros de óxidos de manganeso.
Laterita Amarilla	0,5 - 2,5	Café fuerte	Laterita moderadamente magnética, dura y compacta pero frágil, presenta manchas poco frecuentes, definidas y difusas de color café oscuro. Estructura angular a subangular. Presenta huecos redondeados con revestimiento de costras de limolita (óxidos de hierro).
Saprolito Café	0,5 - 2,0	Café fuerte	Saprolito compacto, muy liviano, blando, muy deleznable de textura limo arcillosa, muy porosa alargada. En general presenta manchas frecuentes medianas a pequeñas y definidas de color amarillento y rojo. También muestra manchas negras de óxidos de manganeso, cortas y delgadas. Estructura granular muy fina. Conserva la estructura relicto de la peridotita, aunque en algunos sectores la transición desde la laterita hasta el saprolito café es muy difuso, y prácticamente solo se pueden diferenciar por el cambio de densidad, donde el saprolito es más liviano respecto a la laterita. Contiene huellas de raíces largas y milimétricas, es porosa alargada.

Saprolito verde	6,0 - 8,0	Verdosa amarillenta	El tope del saprolito verde es muy meteorizado, con manchas de color amarillo oliva, es compacta y dura. Conserva la estructura original de la roca y preserva relictos de peridotita serpentinizada. Se le observan franjas negras alargadas, muy manchada de colores rojizos, verdosos y negros. Hacia la base, el saprolito se presenta moderadamente meteorizado, muy duro y muy compacto pero fácilmente se fragmenta, debido a que se encuentra muy cizallada y fracturada. Presenta zonas o sectores de peridotita saprolitizada, moderadamente difíciles de partir.
Peridotita saprolitizada	Mayor a 16 m	Gris claro a oscuro	Roca muy dura, compacta, estructura masiva. Textura granular de apariencia moteada, muy serpentinizada con magnetita asociada y bastita a partir de piroxeno. Esporádicas venillas irregulares de carbonatos. En algunos sectores, la roca se presenta con estructura cataclástica poco cohesiva con porfiroclastos de la peridotita. En general, la roca se encuentra muy cizallada y fracturada.

Pozo PR-1148: Pozo ubicado en la parte sur del Cerro Porvenir, en el cual se observó un perfil de meteorización de aproximadamente 12 m de espesor correspondientes a: canga magnética, laterita roja magnética, laterita amarilla magnética y saprolito verde. A partir de los 12 m de profundidad se pudo observar la peridotita saprolitizada muy serpentinizada y cizallada (**Figura 2-8**).

Pozo PR-1162: Pozo ubicado en la parte central del Cerro Porvenir, en el cual se encontró un perfil de meteorización de aproximadamente 10 m de espesor correspondientes a: canga magnética, laterita roja magnética, saprolito café y saprolito verde. A partir de los 10 m de profundidad se pudo observar la peridotita saprolitizada, intensamente serpentinizada y cizallada (**Figura 2-8**).

Pozo PR-1136: Pozo ubicado hacia la parte norte del Cerro Porvenir, caracterizado por un perfil de meteorización de aproximadamente 14 m de espesor correspondientes a: canga magnética, laterita roja magnética, saprolito café y saprolito verde. A partir de los 14 m de profundidad se pudo observar la peridotita saprolitizada, intensamente serpentinizada y cizallada (**Figura 2-7** y **Figura 2-8**).

Figura 2-7. Fotografía de las cajas con los núcleos de perforación del pozo PR-1136.

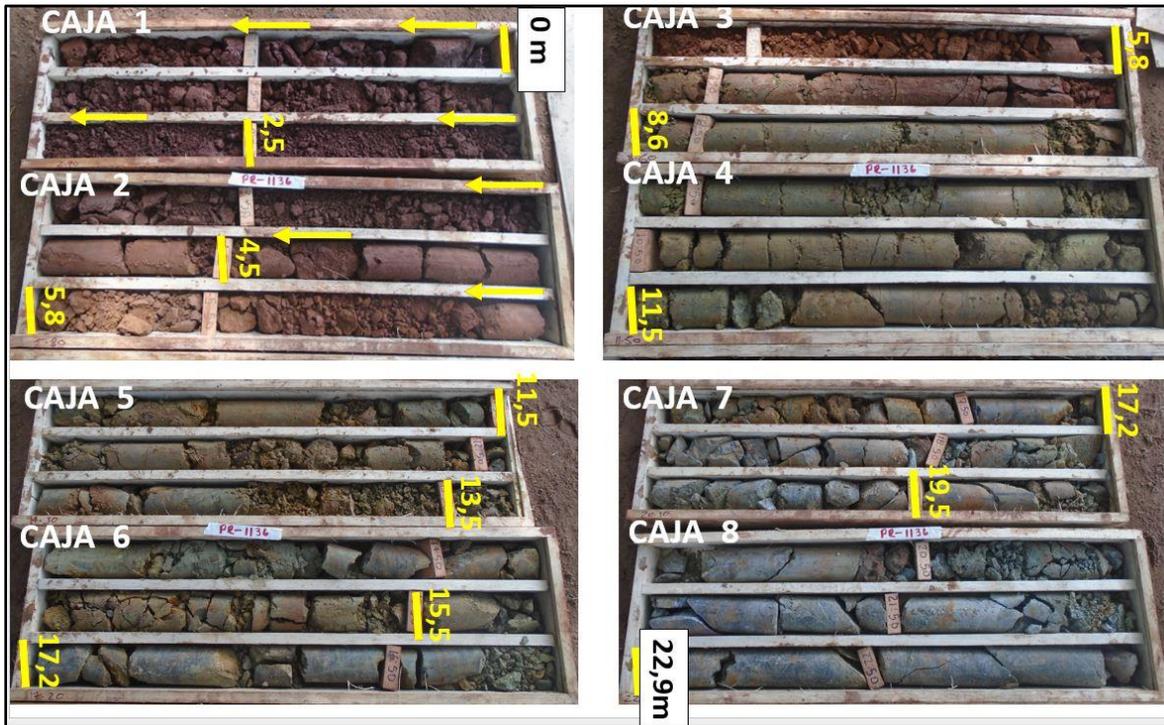
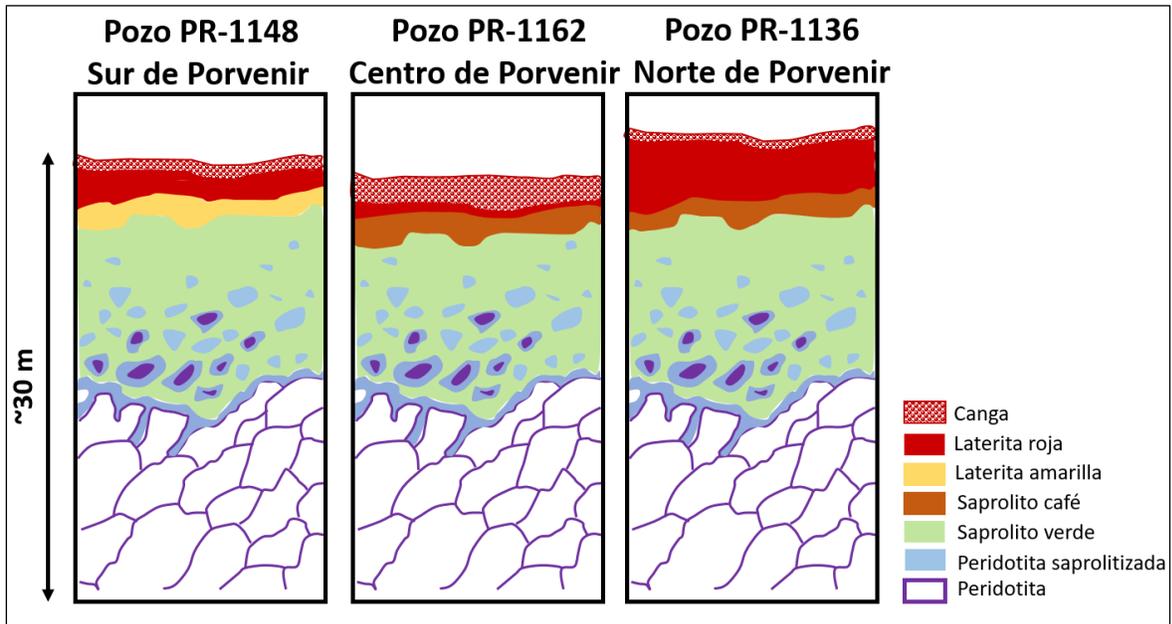


Figura 2-8. Esquema de los perfiles de meteorización de los pozos perforados en Planeta Rica.



3. Capítulo 3: Análisis Petrográfico

Las muestras de roca seleccionadas para análisis petrográfico fueron la CMM-03-3 del área del Pit 2 en Cerro Matoso y la muestra PR-1136-2 del Cerro Porvenir en Planeta Rica.

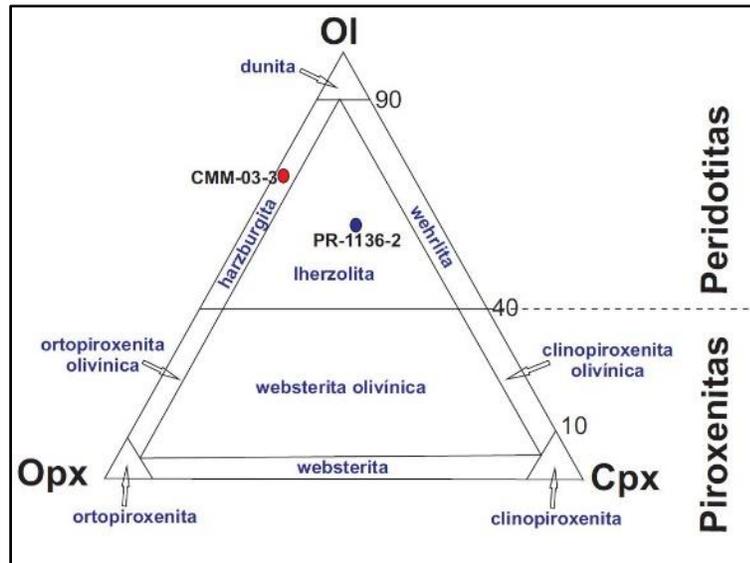
Bajo el microscopio, ambas muestras presentan características texturales y mineralógicas similares (**Tabla 3-1**): textura alotriomórfica inequigranular de grano fino a medio y están conformadas principalmente por olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinelas como minerales accesorios en las rocas. Hay serpentina y magnetita por alteración del olivino y bastita a partir de piroxeno. Microvenillas cortas (0,375mm – 4,5mm de longitud), irregulares, ligeramente sinuosas con un espesor no mayor a 0,05mm rellenas de calcita se presentan siguiendo las fracturas externas de alteración entre los cristales de olivino y piroxeno.

De acuerdo a los porcentajes modales por petrografía, las rocas se clasifican como **harzburgita** en el caso de Cerro Matoso y **lherzolita** en el caso de Planeta Rica (**Figura 3-1**).

Tabla 3-1. Asociación mineralógica en las muestras de roca de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).

Minerales principales	% Modal	
	CMM-03-3	PR-1136-2
Olivino	38	47
Ortopiroxeno	15	14
Clinopiroxeno	1	20
Minerales accesorios		
Espinela	5	7
Minerales de alteración		
Serpentina a partir de olivino	25	15
Bastita a partir de piroxeno	10	5
Magnetita a partir de olivino	4	2
Minerales de introducción		
Calcita	<<1	<<1
Clasificación petrográfica según Streckeisen (1976)	Harzburgita	Lherzolita

Figura 3-1. Diagrama de clasificación de rocas ultramáficas, según Streckeisen (1976) para las muestras de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).



El olivino ocurre como cristales anhedrales, incoloros, con tamaños finogranulares a mediogranulares que van desde 0,875mm a 5mm. Los cristales se encuentran muy fracturados, lo cual favorece la formación de una serpentina de apariencia tabular y coloración amarillenta parda clara (**Figura 3-2 A y B**). El fracturamiento del olivino forma una textura de tipo mesh, en donde quedan finos cristales de olivino (0,15mm-0,2mm) rodeados por serpentina (**Figura 3-2 A**). Clusters muy finos de magnetita residual se concentran hacia las fracturas del olivino y en algunos de sus cristales muy alterados.

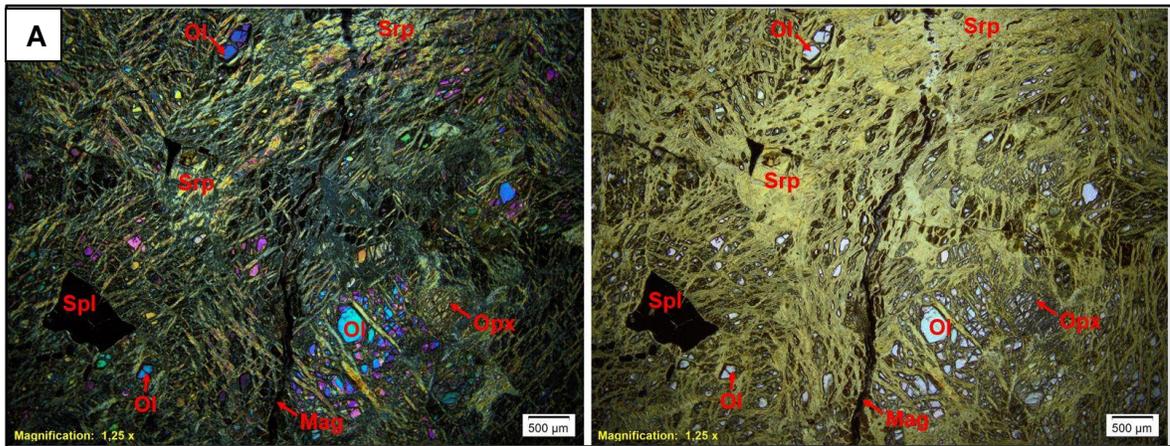
Tanto el ortopiroxeno como el clinopiroxeno tienen formas de cristales anhedrales a subhedrales, incoloros, con tamaños entre 0,5mm y 3mm. Los cristales se encuentran muy fracturados y con alteración parcial a bastita, la cual se presenta con una coloración amarilla clara y birrefringencia baja (**Figura 3-2 B y D**).

Algunos de los cristales de ortopiroxeno presentan lámelas de exsolución de probable clinopiroxeno. Éstos últimos son incoloros de relieve alto y presentan colores de interferencia azul y morado de segundo orden y extinción inclinada, aunque muy difícil de calcular su ángulo. Sin embargo, las exsoluciones en la muestra CMM-03-3 difieren de las que se presentan en la muestra PR-1136-2. En el primer caso, las lámelas de clinopiroxeno son alargadas siguiendo la dirección preferencial de fracturamiento de los cristales de ortopiroxeno con un ancho aproximado de 0,06mm a 0,1mm y un espaciamiento entre una lámela y otra de mínimo 0,25 mm (**Figura 3-2 C**).

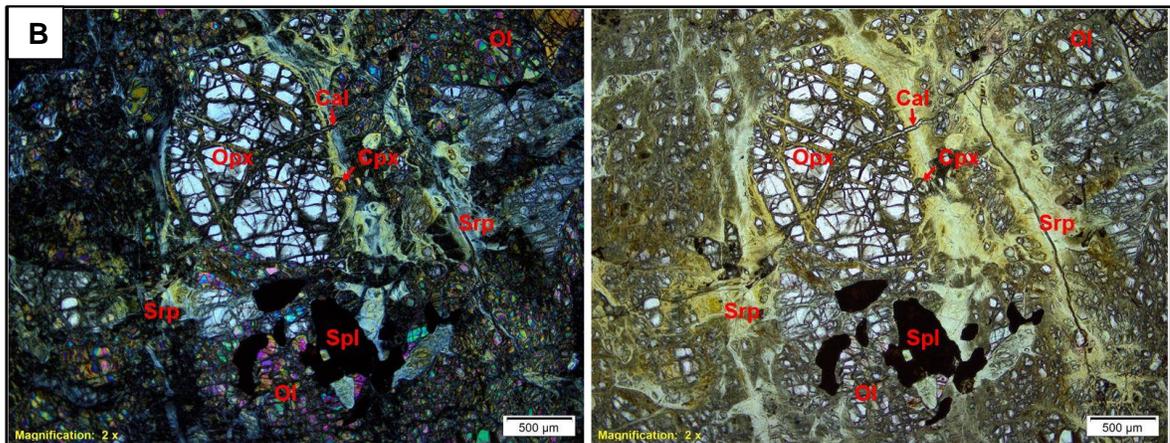
Por el contrario, las lámelas de exsolución de ortopiroxeno y clinopiroxeno en la muestra PR-1136-2, se presentan como intercrecimientos continuos, paralelos y muy delgados de aproximadamente 0,015 mm de espaciamiento entre ellas (**Figura 3-2 D**).

Los cristales de cromo-espinela en la muestra CMM-03-3 son euhedrales a subhedrales con formas hexagonales a pseudo-cúbicas. En la muestra PR-1136-2 son subhedrales a anhedrales con formas de pseudo-hexágonos. La tonalidad de los cristales es parda rojiza oscura a negra, son isotrópicos, con tamaño entre 0,1mm y 1,25mm. Los cristales muestran fracturas oblicuas a la longitud del cristal (**Figura 3-2 A y B**). Se encuentran interagregados con olivino y piroxeno y en el caso de la muestra PR-1136-2, algunas cromo-espinelas presentan inclusiones de olivino fresco y/o serpentinizado.

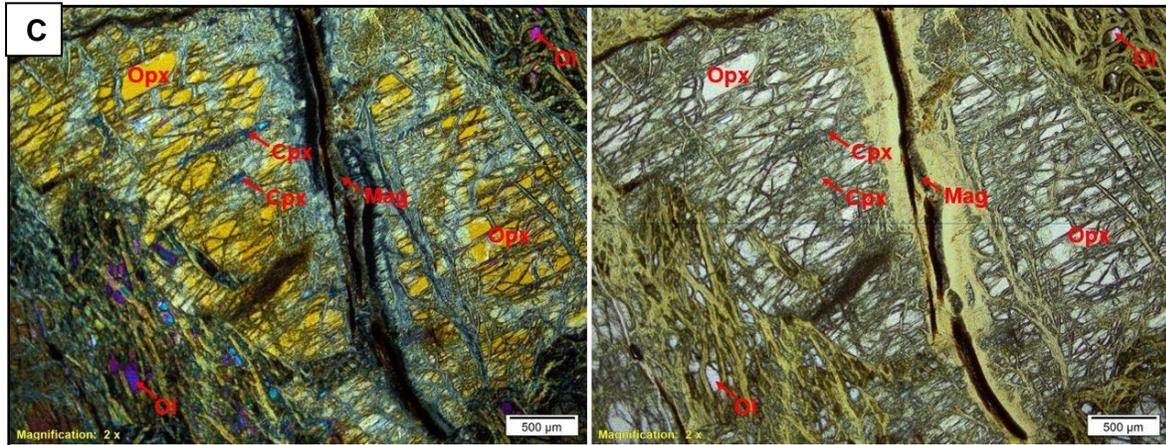
Figura 3-2. Microfotografías de rocas ultramáficas de Cerro Matoso (CMM-03-3) y Planeta Rica (PR-1136-2).



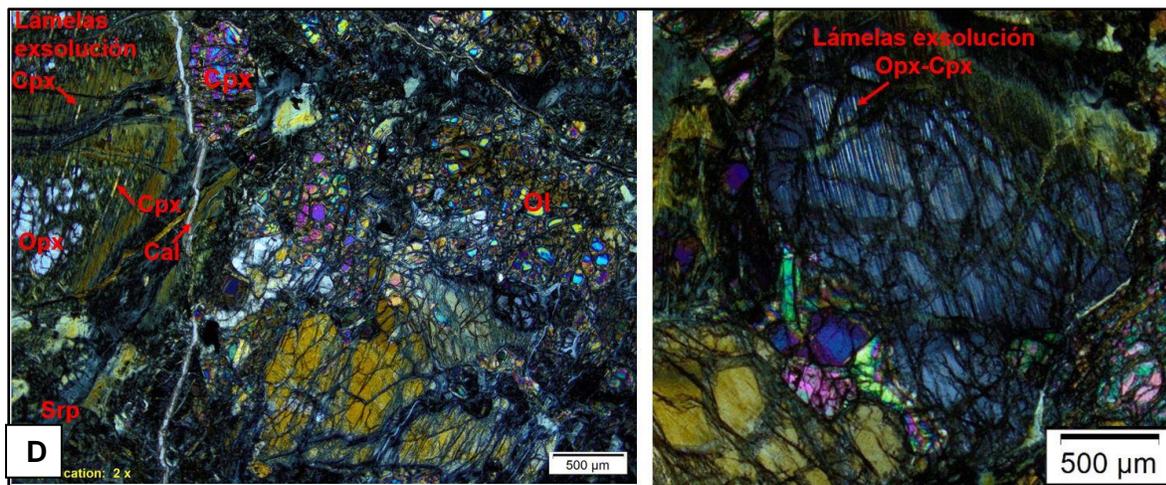
A) Muestra CMM-03-3. Se observan cristales de ortopiroxeno y olivino fracturados lo que favorece la serpentización y textura mesh. Al lado inferior izquierdo se observa un cristal de espinela. Foto con nícoles cruzados a la izquierda y nícoles paralelos a derecha.



B) Muestra PR-1136-2. Cristal de ortopiroxeno muy fracturado con evidencias de serpentización. Se observa una fractura de calcita que atraviesa el cristal. Además una espinela parda rojiza subhedral intercrecida con olivino. Foto con nícoles cruzados a la izquierda y nícoles paralelos a derecha.



C) Muestra CMM-03-3. Ortopiroxeno con láminas de exsolución de clinopiroxeno y magnetita segregada en fracturas. Foto con nicos cruzados a la izquierda y nicos paralelos a derecha.



D) Muestra PR-1136-2. Ortopiroxeno con láminas de exsolución de clinopiroxeno. Fotos con nicos cruzados.

Abreviaturas minerales: Olivino (Ol) - Ortopiroxeno (Opx) - Clinopiroxeno (Cpx)-Serpentina (Srp) - Espinela (Spl) - Magnetita (Mag) - Calcita (Cal).

4. Capítulo 4: Análisis Geoquímico

Los resultados de los análisis geoquímicos obtenidos se presentan en la **Tabla 4-1**. Se analizaron los contenidos de óxidos mayores (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 y MgO), óxidos menores relevantes (NiO , Co_3O_4 , MnO , Cr_2O_3), otros óxidos y elementos traza (CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Sc_2O_3 , SO_3 , Cu y Zn) en porcentaje en peso (wt%) y EGP y Au (en ppb).

Los patrones de distribución de EGP han sido divididos en dos grupos según sus asociaciones (Rollinson, 1993): el grupo del iridio (IPGE- Os, Ir, Ru) y el grupo del paladio (PPGE- Rh, Pd, Pt), en este último grupo se incluye Au. Los valores de EGP se presentan normalizados a un condrito o manto primitivo.

El Sc se grafica de manera independiente de los EGP dado que no entra en este grupo. Sin embargo resulta importante conocer su comportamiento en el perfil porque también es considerado como un elemento de alta tecnología (U.S Geological Survey, 2018) y como punto de comparación con el depósito de laterita de Sc-Pt-Co y Ni del proyecto minero Owendale Platinum and Scandium en Australia (Platina Resources Limited, 2017).

4.1 Geoquímica de Cerro Matoso

4.1.1 Geoquímica de elementos mayores y menores en Cerro Matoso

En la **Figura 4-1** se grafican los patrones litogeoquímicos de los elementos mayores y elementos menores relevantes para los perfiles de meteorización CMM-01 y CMM-03.

En general, el contenido de Fe_2O_3 es el principal componente en la zona limonítica tanto para el perfil CMM-01 como para el CMM-03, con valores entre 66 y 71,6 wt%, que disminuyen fuertemente hacia la zona de saprolito verde y peridotita saprolitizada con valores de ~13wt%. Por otro lado, el SiO_2 y MgO son los principales componentes en la peridotita saprolitizada y el saprolito, con valores entre 41 y 46 wt% de SiO_2 y 25 a 32 wt% de MgO (los valores más altos corresponden a la peridotita), y que son agotados hacia la parte superior del perfil, alcanzando valores de hasta 6 wt% de SiO_2 y 0,6 wt% en MgO . Marcando así, la zona de

discontinuidad de Mg² en el límite entre la laterita roja y el saprolito verde en el perfil CMM-01 y en la parte inferior de la zona limonítica del perfil CMM-03 (**Figura 4-1**).

De manera adicional, se observa que el contenido de SiO₂ incrementa hasta 22,96 wt% en la muestra CMM-03-LA-N3 del perfil, por encima del rango normal de esta zona de meteorización <2 wt% (Gleeson et al., 2003; Freyssinet et al., 2005), lo cual coincide con una franja de fragmentos silíceos en el Nivel III (**Figura 2-4**).

El NiO presenta valores entre 1,2 y 1,9 wt% en la zona de lateritas y de 2,4 wt% en la zona de saprolito verde en el caso del perfil CMM-01 y se agota en la peridotita saprolitizada con un valor de 0,061 wt% a excepción del valor obtenido en la zona de roca del perfil CMM-03 en donde presenta un enriquecimiento inusual de hasta 2,8 wt% de NiO. Este enriquecimiento puede corresponder a una peridotita saprolitizada con costras de saprolito verde de coloración amarilla verdosa lo cual favorece un incremento en el contenido de Ni en la roca³.

El MnO y el Co₃O₄ presentan un patrón muy similar a lo largo de todo el perfil de meteorización, en donde los contenidos de estos óxidos es mayor en la parte superior del perfil con valores entre 0,7 y 1,44 wt% de MnO y 0,6 a 1,02 wt% de Co₃O₄. Estos valores disminuyen de manera progresiva hacia la zona de saprolito y de roca con valores ~0,14wt% de MnO y ~0,06 – 0,19 wt% de Co₃O₄.

Se resalta un pico de concentración de ambos óxidos metálicos en la muestra CMM-03-LA-N2 (1,44 wt% de MnO y 1,017 wt% de Co₃O₄) que corresponde a un nivel muy próximo a la zona de discontinuidad de Mg.

Por otra parte, el Cr₂O₃ también es enriquecido en el horizonte limonítico con valores >2,9wt%, pero es mucho más alto en el perfil CMM-03 en donde alcanza valores de hasta 3,69wt%, y disminuye fuertemente a partir de los horizontes de saprolito y roca con valores <0,6 wt%.

² **Zona de discontinuidad de Mg en depósitos lateríticos de Ni:** Zona marcada por una declinación abrupta en el contenido de MgO de >~20 a 2 wt% (Freyssinet et al., 2005).

³ En la mina de Cerro Matoso, se aprovecha este tipo de material (roca con costras de saprolito) para realizar un proceso llamado de **upgrading**, el cual consiste en llevar este material a un proceso mecánico para liberar las costras de saprolito enriquecidas en Ni y dejar como rechazo los bloques de material estéril, ya que mezclados entre sí se bajaría el grado de Ni en las pilas que van para los hornos de fundición.

Tabla 4-1. Contenido de elementos óxidos mayores, menores (en wt%) y elementos del grupo del platino y oro (en ppb) de tres perfiles de meteorización de la Ultramafita de Cerro Matoso y la Peridotita de Planeta Rica.

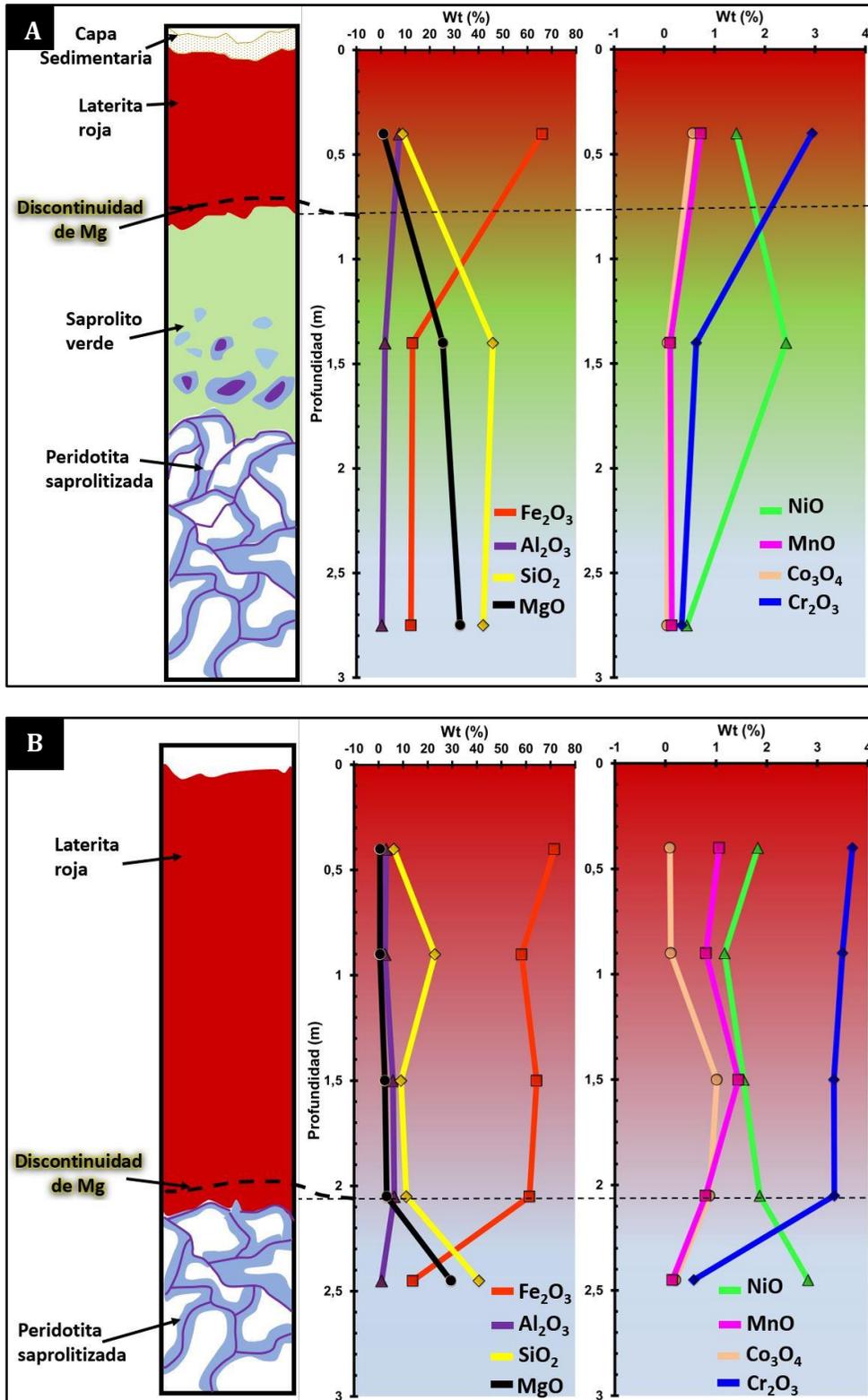
		Perfil CMM-01 (Cerro Matoso)			Perfil CMM-03 (Cerro Matoso)					Pozo PR-1136 (Planeta Rica)								
Muestras		CMM-01-LA	CMM-01-SV	CMM-01-PS	CMM-03-LA-N4	CMM-03-LA-N3	CMM-03-LA-N2	CMM-03-LA-N1	CMM-03-PS	1-PR-1136-C-LR	2-PR-1136-C-LR	PR-1136-LR	PR-1136-LA	PR-1136-LA-SC	PR-1136-SC	1-PR-1136-SV	2-PR-1136-SV	PR-1136-P
Tipo de Material		LR	SV	PS	LR	LR con silice	LR	LR	PS	C	C + LR	LR	LR	LR	SC	SV	SV	P
Desde (m)		0	0,8	2	0	0,8	1	2	2,1	0	0,1	0,8	2,9	5,4	5,8	6,6	7,25	26,5
Hasta(m)		0,8	2	3,5	0,8	1	2	2,1	2,8	0,1	0,8	2,9	5,4	5,8	6,6	7,25	14,1	26,75
wt%	dl																	
SiO ₂	0,01	8,96	45,83	41,87	6,23	22,96	9,18	11,29	40,84	6,72	6,5	3,27	2,85	2,6	2,7	22,8	38,61	38,63
Al ₂ O ₃	0,01	7,56	1,74	0,41	3,14	2,67	5,82	6,43	1,21	8,8	11,34	9,45	10,31	9,29	7,81	6,43	2,32	1,01
Fe ₂ O ₃	0,01	66,18	13,02	12,34	71,64	58,28	64,32	61,41	13,96	72,03	66,45	73,01	72,4	72,04	71,83	53,11	19,48	8,19
MnO	0,01	0,73	0,12	0,15	1,06	0,8	1,44	0,79	0,14	1,23	0,63	0,4	0,44	0,67	1,29	0,91	0,27	0,11
MgO	0,01	1,08	25,43	32,44	0,62	0,58	2,59	3,33	29,44	0,62	1,41	1,24	1,31	1,29	1,47	3,34	23,85	38,05
CaO	0,01	0,02	0,48	0,04	<dl	<dl	0,01	0,05	0,26	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	1,07
Na ₂ O	0,01	<dl	0,02	<dl	0,02	0,02	<dl	<dl	0,01	0,03	0,03	<dl	<dl	0,03	0,02	0,06	0,03	<dl
K ₂ O	0,01	<dl	<dl	0,01	0,01	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0,01	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
TiO ₂	0,01	0,1	0,01	<dl	0,06	0,05	0,06	0,05	0,02	0,1	0,19	0,12	0,09	0,09	0,08	0,05	0,04	<dl
P ₂ O ₅	0,002	0,088	0,006	0,006	0,012	0,01	0,013	0,015	0,009	0,009	0,043	0,028	0,021	0,019	0,016	0,006	0,004	0,005
Cr ₂ O ₃	0,005	2,943	0,635	0,349	3,692	3,492	3,327	3,334	0,561	1,699	2,746	3,014	2,550	2,751	2,793	1,887	0,690	0,375
Sc ₂ O ₃	0,004	0,013	<dl	<dl	0,01	0,009	0,011	0,011	<dl	0,015	0,017	0,013	0,016	0,016	0,015	0,011	<dl	<dl
SO ₃	0,002	0,076	0,003	<dl	0,343	0,242	0,24	0,161	0,02	0,162	0,24	0,296	0,345	0,353	0,284	0,062	0,024	0,017
Ni	0,005	1,130	1,906	0,353	1,433	0,916	1,211	1,463	2,215	0,717	0,754	0,784	0,801	0,980	1,163	1,668	2,510	0,217
Co	0,005	0,14	0,017	0,015	0,022	0,026	0,249	0,213	0,048	0,091	0,07	0,049	0,05	0,095	0,199	0,125	0,037	0,01
Cu	0,005	0,011	<dl	<dl	<dl	<dl	0,011	0,01	<dl	0,009	0,012	0,012	0,011	0,016	0,029	0,017	0,008	<dl
Zn	0,005	0,033	0,007	0,005	0,038	0,051	0,05	0,065	0,052	0,032	0,031	0,028	0,03	0,038	0,059	0,06	0,054	<dl
LOI	0,01	10,23	10,16	12,16	11,39	9,29	10,8	10,64	10,67	7,13	9,31	8,29	8,72	9,38	9,98	8,7	11,12	12,04

		Perfil CMM-01 (Cerro Matoso)			Perfil CMM-03 (Cerro Matoso)					Pozo PR-1136 (Planeta Rica)								
Muestras		CMM-01-LA	CMM-01-SV	CMM-01-PS	CMM-03-LA-N4	CMM-03-LA-N3	CMM-03-LA-N2	CMM-03-LA-N1	CMM-03-PS	1-PR-1136-C-LR	2-PR-1136-C-LR	PR-1136-LR	PR-1136-LA	PR-1136-LA-SC	PR-1136-SC	1-PR-1136-SV	2-PR-1136-SV	PR-1136-P
Tipo de Material		LR	SV	PS	LR	LR con silice	LR	LR	PS	C	C + LR	LR	LR	LR	SC	SV	SV	P
<i>ppb</i>	<i>dl</i>																	
Os	1	8	2	5	32	18	11	14	4	10	11	13	16	19	16	11	3	3
Ir	1	22	6	6	33	27	29	24	7	32	30	32	35	34	31	23	8	4
Ru	1	30	12	10	63	49	52	50	12	74	68	57	66	63	63	39	15	7
Rh	1	<dl	2	2	12	9	10	10	2	12	11	12	13	12	12	7	3	1
Pd	1	41	8	3	58	46	53	39	13	61	50	47	55	55	74	30	17	7
Pt	1	40	12	8	61	47	60	44	12	83	58	64	70	67	63	39	21	8
Au	2	8	4	5	6	8	19	21	5	4	7	7	12	11	24	9	8	7
Total (wt%)	0,01	99,69	99,95	100,28	100	99,62	99,71	99,72	100,1	99,65	99,9	100,05	99,95	99,73	100,05	99,84	99,82	99,8
ΣEGP (ppb)		141	42	34	259	196	215	181	50	272	228	225	255	250	259	149	67	30
Pt/Pd		0,98	1,50	2,67	1,05	1,02	1,13	1,13	0,92	1,36	1,16	1,36	1,27	1,22	0,85	1,30	1,24	1,14
Pt/Ir		1,82	2,00	1,33	1,85	1,74	2,07	1,83	1,71	2,59	1,93	2,00	2,00	1,97	2,03	1,70	2,63	2,00
Pt/Rh			6,00	4,00	5,08	5,22	6,00	4,40	6,00	6,92	5,27	5,33	5,38	5,58	5,25	5,57	7,00	8,00
Pt/Ru		1,33	1,00	0,80	0,97	0,96	1,15	0,88	1,00	1,12	0,85	1,12	1,06	1,06	1,00	1,00	1,40	1,14
Pt/Os		5,00	6,00	1,60	1,91	2,61	5,45	3,14	3,00	8,30	5,27	4,92	4,38	3,53	3,94	3,55	7,00	2,67
IPGE		60	20	21	128	94	92	88	23	116	109	102	117	116	110	73	26	14
PPGE		81	22	13	131	102	123	93	27	156	119	123	138	134	149	76	41	16
IPGE/PPGE		0,74	0,91	1,62	0,98	0,92	0,75	0,95	0,85	0,74	0,92	0,83	0,85	0,87	0,74	0,96	0,63	0,88
**																		
NiO (wt%)		1,438	2,425	0,449	1,824	1,166	1,541	1,862	2,819	0,912	0,959	0,998	1,019	1,247	1,480	2,123	3,194	0,276
Co ₃ O ₄ (wt%)		0,572	0,069	0,061	0,090	0,106	1,017	0,870	0,196	0,372	0,286	0,200	0,204	0,388	0,813	0,511	0,151	0,041
Sc (ppm)		42,38	-	-	32,60	29,34	35,86	35,86	-	48,90	55,42	42,38	52,16	52,16	48,90	35,86	-	-

** Valores calculados <dl: Por debajo del límite de detección

C: Canga LR: Laterita Roja SC: Saprolito Café SV: Saprolito Verde PS: Peridotita Saprolitizada P: Peridotita

Figura 4-1. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso mostrando los contenidos de elementos mayores y menores relevantes. A) Perfil CMM-01 (Cerro Esmeralda) y B) Perfil CMM-03 (Banco 154 Pit 2).



4.1.2 Geoquímica de los elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au en el área de Cerro Matoso

La **Figura 4-2** muestra los patrones de distribución de los EGP, Sc y Au en los perfiles de meteorización CMM-01 y CMM-03.

En general, se puede observar para ambos perfiles que los mayores contenidos de EGP se concentran hacia la zona limonítica y presentan una fuerte declinación en el horizonte saprolítico y la peridotita saprolitizada. También es visible que las concentraciones más altas corresponden a Pt y Pd y las más bajas a Os, Ir y Rh.

El perfil de laterización CMM-01 presenta las concentraciones más bajas de EGP respecto a las encontradas en el perfil CMM-03. El contenido total de EGP en la laterita roja del perfil CMM-01 es de 141 ppb y el total de EGP en la zona limonítica del perfil CMM-03 varía entre 181 ppb y 259 ppb, correspondiendo este último valor al primer intervalo del perfil de tope a base. En ambos perfiles de meteorización, la concentración total de EGP en la zona de saprolito y roca es <50 ppb.

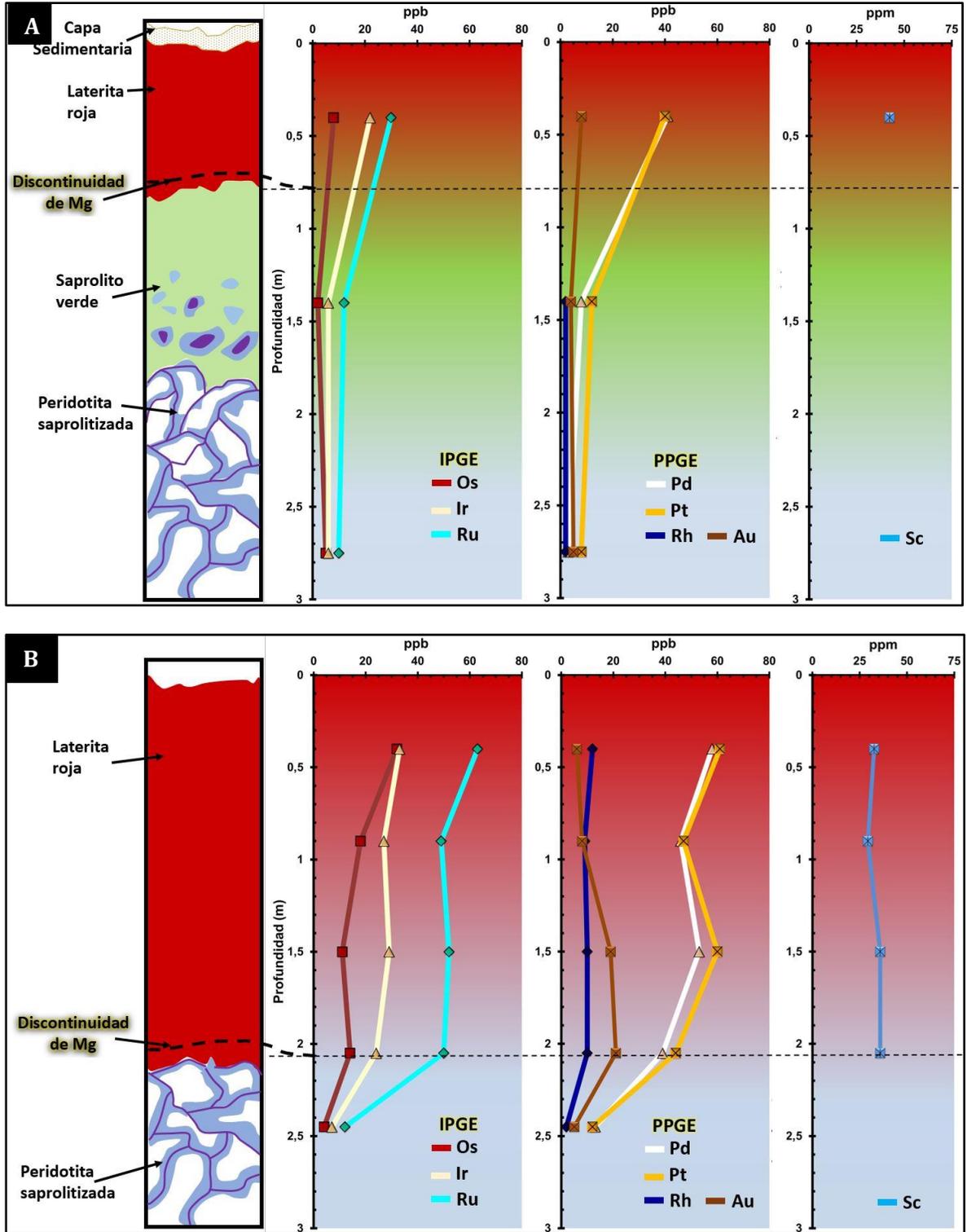
En el **perfil CMM-01** las concentraciones más altas corresponden a Pd, Pt y Ru con valores de 41, 40 y 30 ppb, respectivamente. Los demás EGP presentan concentraciones por debajo de los 22 ppb, siendo los más bajos el Os con 8 ppb y el Rh que está por debajo del límite de detección en la zona limonítica. Las concentraciones de dichos elementos tanto en el saprolito verde como en la peridotita saprolitizada están entre 2 ppb y 12 ppb. Los valores de Sc sólo se encuentran en la laterita roja con 42 ppm y el contenido de Au en todo el perfil se encuentra entre 4 ppb y 8 ppb.

En el **perfil CMM-03** las concentraciones más altas corresponden a los elementos Ru, Pt y Pd con valores de 49 – 63 ppb de Ru, 44 – 61 ppb de Pt y 39 – 58 ppb de Pd. Las concentraciones más bajas corresponden a Rh, Os e Ir, con valores de 9 - 12 ppb de Rh, 11-32 de Os y 24 – 33 ppb de Ir. Los mayores picos de acumulación de los EGP se encuentran en el primer y tercer intervalo del perfil de tope a base. El primer intervalo (laterita roja) concentra la mayor cantidad de estos elementos con valores de 63 ppb de Ru, 61 ppb de Pt y 58 ppb de Pd. Todos los EGP son agotados en la peridotita saprolitizada con concentraciones entre 4 ppb y 13 ppb.

Los valores de Sc son muy homogéneos en la zona de limonitas (~33,4 ppm) y se agotan casi totalmente hacia la peridotita, donde presentan valores por debajo del límite de detección. Los contenidos de Au en el perfil CMM-03 son muy bajos (~6 ppb) con un pico de 21 ppb en la muestra de la zona de transición de la laterita roja a la peridotita saprolitizada.

Figura 4-2. Perfiles de meteorización en Cerro Matoso mostrando los contenidos de elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au.

A) Perfil CMM-01 (Cerro Esmeralda) y B) Perfil CMM-03 (Banco 154 Pit 2)



4.1.3 EGP normalizados en perfiles de meteorización de Cerro Matoso a la condrita

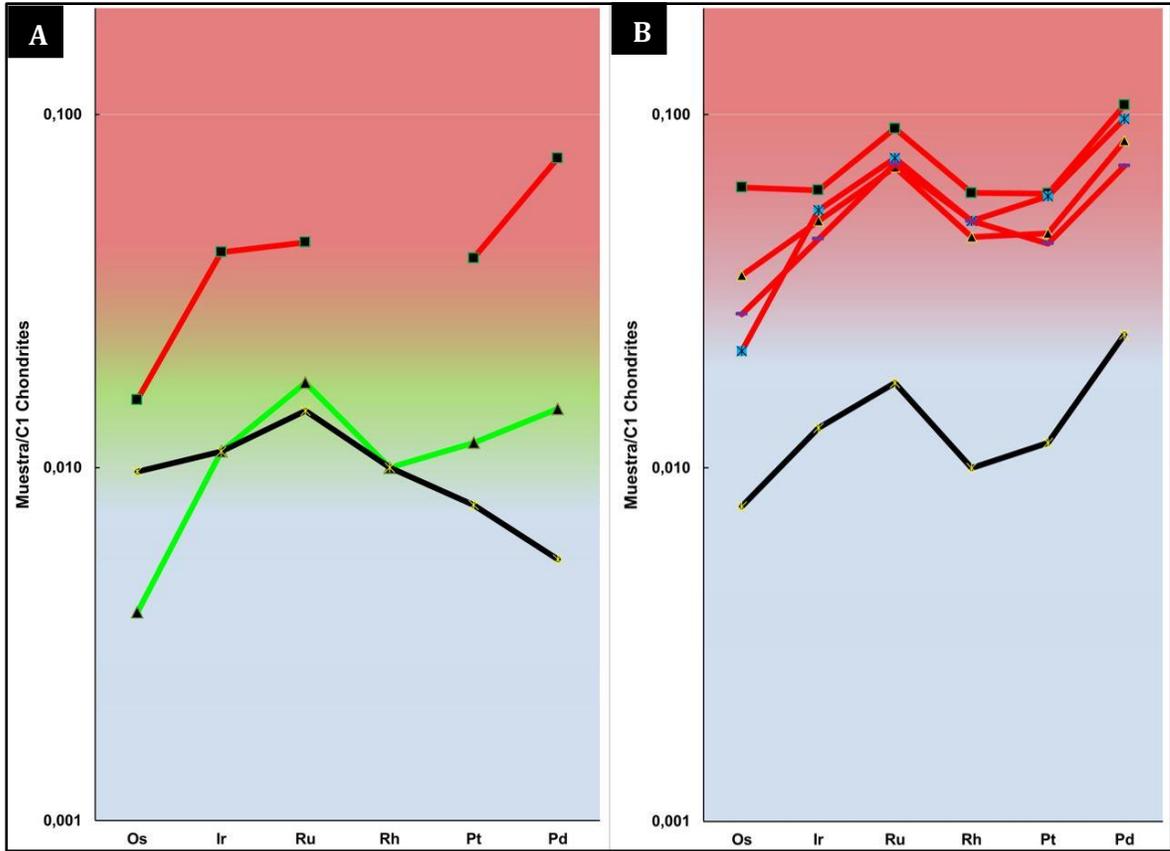
En la **Figura 4-3** se presentan los diagramas de EGP normalizados a la condrita según Naldrett y Duke (1980) para los dos perfiles de laterización tomados en la Mina de Cerro Matoso (CMM-01 y CMM-03) con el fin de identificar los patrones de distribución de EGP en cada uno de ellos.

En el caso del **perfil CMM-01**, el patrón de EGP que se presenta en la peridotita saprolitizada no se conserva en los niveles superiores del perfil de meteorización. En la peridotita saprolitizada se observa una anomalía positiva en Ru y una anomalía negativa un poco más notoria en Pd, contrario a lo que se observa en la zona de saprolito verde en donde hay una marcada anomalía negativa en Os y una menos pronunciada en Rh y anomalías positivas en Ru y Pd. Lo anterior refleja un leve enriquecimiento en la zona saprolítica de Ru, Pd y Pt. Sin embargo, al subir en el perfil de meteorización hasta la zona de laterita roja, todos los EGP son incrementados en casi cinco (5) veces a excepción del Rh que se queda en la roca.

En el **perfil CMM-03** a diferencia del perfil CMM-01, se puede observar que se conserva el patrón de distribución de los EGP de la peridotita saprolitizada hasta el nivel más superior de la zona limonítica, con anomalías positivas en Ru y Pd y anomalías negativas en Rh y Pt. Todos los EGP están casi diez (10) veces por encima de los valores de la roca, siendo las muestras CMM-03-LA-N4 (primer intervalo del perfil de tope a base) y CMM-03-LA-N2 (tercer intervalo del perfil de tope a base) las más enriquecidas.

Figura 4-3. Patrones de EGP normalizados a la condrita de las muestras de dos perfiles de laterización en la Mina de Cerro Matoso. Valores de normalización de Naldrett y Duke (1980).

A) Perfil CMM-01 (Cerro Esmeralda) y B) Perfil CMM-03 (Banco 154 Pit 2).



- Laterita Roja (CMM-01-LA)
- ✕ Peridotita saprolitizada (CMM-01-PS)
- ▲ Sapolito verde (CMM-01-SV)

- Laterita Roja (CMM-03-LA-N4)
- ▲ Laterita Roja (CMM-03-LA-N3)
- ✕ Laterita Roja (CMM-03-LA-N2)
- ✕ Laterita Roja (CMM-03-LA-N1)
- ✕ Peridotita saprolitizada (CMM-03-PS)

4.2 Geoquímica del perfil laterítico de Planeta Rica

4.2.1 Geoquímica de elementos mayores y menores en Planeta Rica

El patrón litogeoquímico de los elementos mayores y elementos menores relevantes para el perfil de meteorización PR-1136 se presenta en la **Figura 4-4**.

Así mismo como en los perfiles litogeoquímicos de Cerro Matoso, el Fe_2O_3 es el principal componente en la zona de canga y laterita en un ~ 71 wt% y disminuye hacia la parte inferior del perfil en la zona de saprolito verde con 53 wt% y la roca ligeramente meteorizada a fresca en un ~ 8 wt%. De manera inversa se observa que el SiO_2 y MgO son los principales componentes en la peridotita y el saprolito (~ 38 wt% y 23 – 38 wt%, respectivamente), y se agotan hacia la parte superior del perfil, alcanzando valores de hasta 3 wt% de SiO_2 y 0,6 wt% en MgO .

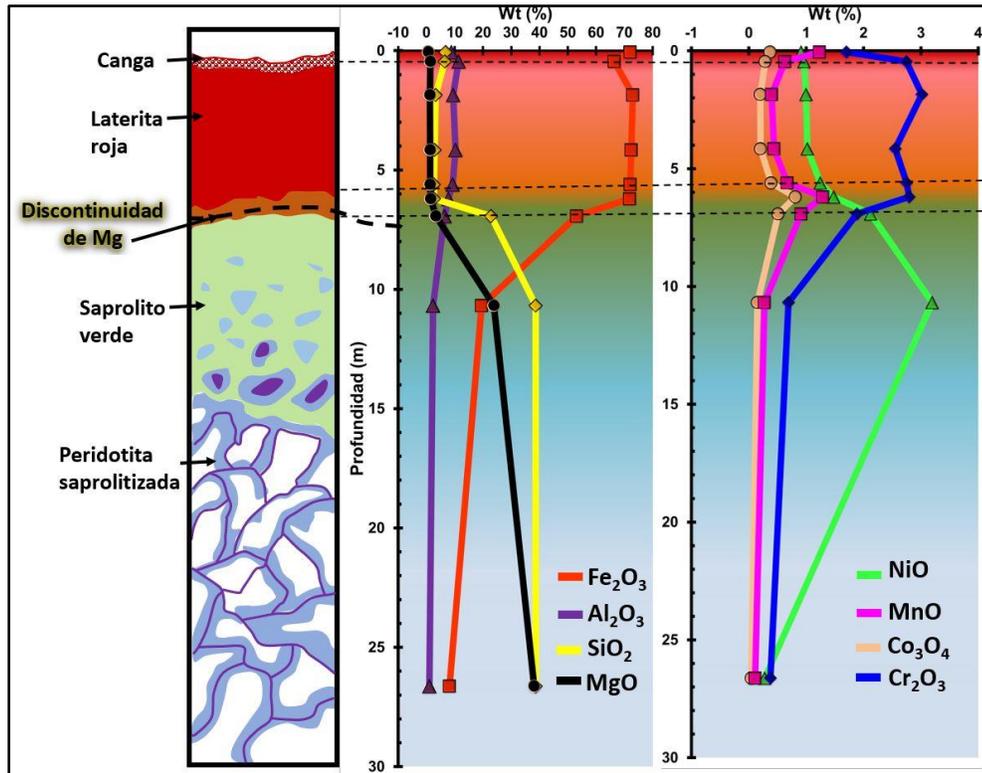
El NiO presenta valores de ~ 1 wt% en la zona de lateritas y es enriquecido en la zona de saprolitos con valores de ~ 2 wt% alcanzando un pico de hasta 3,2 wt% y siendo fuertemente agotado en la peridotita serpentizada con valores $< 0,3$ wt%.

El MnO y el Co_3O_4 presentan un patrón muy similar a lo largo de todo el perfil de meteorización, en donde los contenidos de estos óxidos es mayor en las limonitas ($\sim 0,6$ wt% y $\sim 0,38$ wt%, respectivamente) y mucho menor a partir de la parte superior del saprolito verde ($\sim 0,19$ wt% y $\sim 0,09$ wt%, respectivamente), aunque se resalta un pico de de acumulación de ambos óxidos metálicos en el área de la canga y en la zona de transición de limonita a saprolito ($> 1,2$ wt% de MnO y $> 0,8$ wt% de Co_3O_4). Por otra parte, el Cr_2O_3 también es enriquecido en las limonitas con valores $> 2,5$ wt% y disminuye a partir de la zona de transición con valores $< 0,9$ wt%.

En general, se observa que hay un claro patrón en el cual el Fe_2O_3 , MnO , Co_3O_4 y Cr_2O_3 presentan sus mayores concentraciones en el horizonte de la limonita y justo en la zona de transición entre la laterita roja y el saprolito verde hay una fuerte disminución de sus porcentajes hasta llegar a los valores más bajos en la roca. Lo contrario sucede con los contenidos de SiO_2 y MgO , los cuales tienen las concentraciones más altas en la roca y va disminuyendo progresivamente hacia el nivel de saprolito, sin embargo, también tiene un cambio abrupto en la zona de transición saprolito-laterita con contenidos muy bajos. El NiO se concentra en la zona saprolítica del perfil.

El comportamiento de estos elementos a lo largo del perfil es característico de un depósito de silicato de Mg hidratado, en donde el horizonte de mena se ubica por debajo de la zona de discontinuidad de Mg . (Brand et al., 1998; Freyssinet et al., 2005), que para el perfil analizado corresponde a la zona de transición entre la laterita roja y el saprolito verde.

Figura 4-4. Perfil de meteorización del pozo PR-1136 (Planeta Rica) mostrando los contenidos de elementos mayores y menores relevantes.



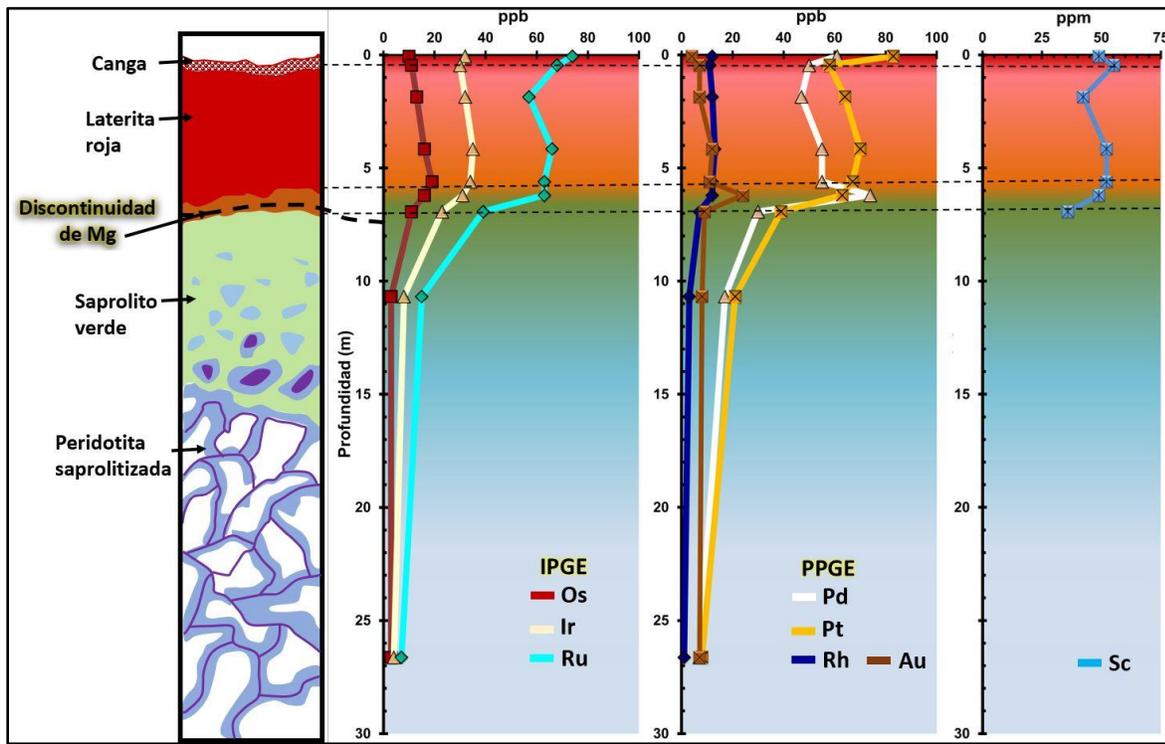
4.2.2 Geoquímica de los elementos del grupo del platino (EGP), Sc y Au en Planeta Rica

La **Figura 4-5** muestra el patrón de distribución de los EGP, Sc y Au en el perfil PR-1136.

Los mayores contenidos de EGP se concentran hacia el horizonte limonítico y son fuertemente agotados desde la parte superior del sapolito verde hasta la peridotita. Las concentraciones más altas corresponden a 54 - 83 ppb de Pt, 47 - 74 ppb de Pd y 57 - 74 ppb de Ru, en donde se observan los mayores picos de acumulación de dichos elementos en la zona de canga y en la zona de transición de laterita a sapolito. Las concentraciones para Os varían entre 10 y 19 ppb, Ir está entre 30 y 32 ppb y Rh entre 11 y 13 ppb. Los contenidos de Au son muy bajos (~8 ppb), sin embargo, también presenta su mayor pico de 24 ppb en la zona de transición del perfil de laterización. Los valores de Sc son muy homogéneos en la zona de limonitas (~48 ppm) y son completamente agotados en los niveles inferiores del perfil.

El contenido total de EGP en la zona superior del perfil (canga hasta zona de transición) varía entre 225 ppb y 272 ppb y el contenido total de EGP en la zona inferior del perfil (sapolito verde y roca) varía entre 30 ppb y 149 ppb. Las concentraciones más altas de los EGP se encuentran en la canga con 272 ppb y en la zona de transición de laterita a sapolito con 259ppb.

Figura 4-5. Perfil de meteorización del pozo PR-1136 (Planeta Rica) donde se observa la variación de los contenidos de EGP, Sc y Au.



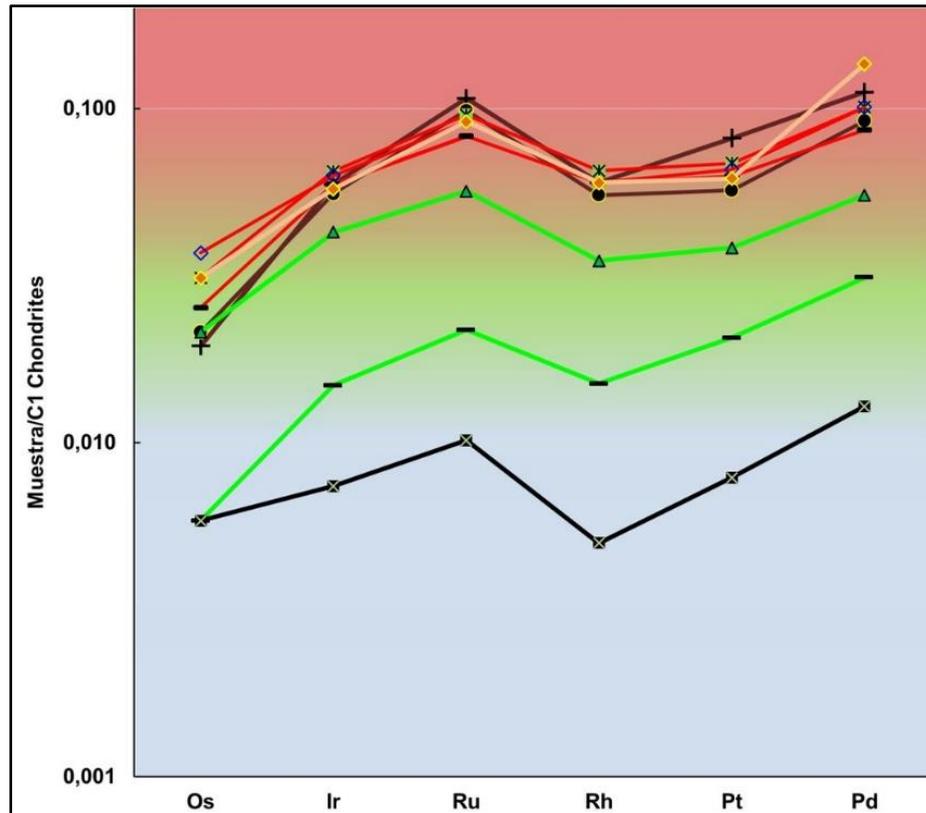
4.2.3 EGP normalizados en perfil de meteorización de Planeta Rica a la condrita

En la **Figura 4-6** se presenta el diagrama de EGP normalizados a la condrita según Naldrett y Duke (1980) para el perfil de laterización de Planeta Rica con el fin de identificar los patrones de distribución de EGP en cada una de las zonas.

En el caso de la zona limonítica, es posible apreciar que se conserva un patrón cóncavo de la roca. Este perfil muestra una anomalía positiva en Ru y Pd y una anomalía negativa en Rh, y una ligera anomalía negativa de Pt en la zona de limonitas.

Por otra parte, los valores totales de EGP son enriquecidos a medida que se aumenta en el perfil de laterización de la roca a excepción del Os. Este último probablemente permanece en la roca ya que no es posible apreciar un incremento significativo de este elemento en el perfil.

Figura 4-6. Patrones de EGP normalizados a la condrita de las muestras del pozo PR-1136 (Planeta Rica). Valores de normalización de Naldrett and Duke (1980).



- +— Canga (1-PR-1136-C-LR)
- Canga + Laterita Roja (2-PR-1136-C-LR)
- Laterita Roja (PR-1136-LR)
- ×— Laterita Roja (PR-1136-LA)
- ◇— Laterita Roja (PR-1136-LA-SC)
- ◆— Trans. Laterita Roja-Sapolito verde (PR-1136-SC)
- ▲— Sapolito verde (1-PR-1136-SV)
- △— Sapolito verde (2-PR-1136-SV)
- ×— Peridotita (PR-1136-P)

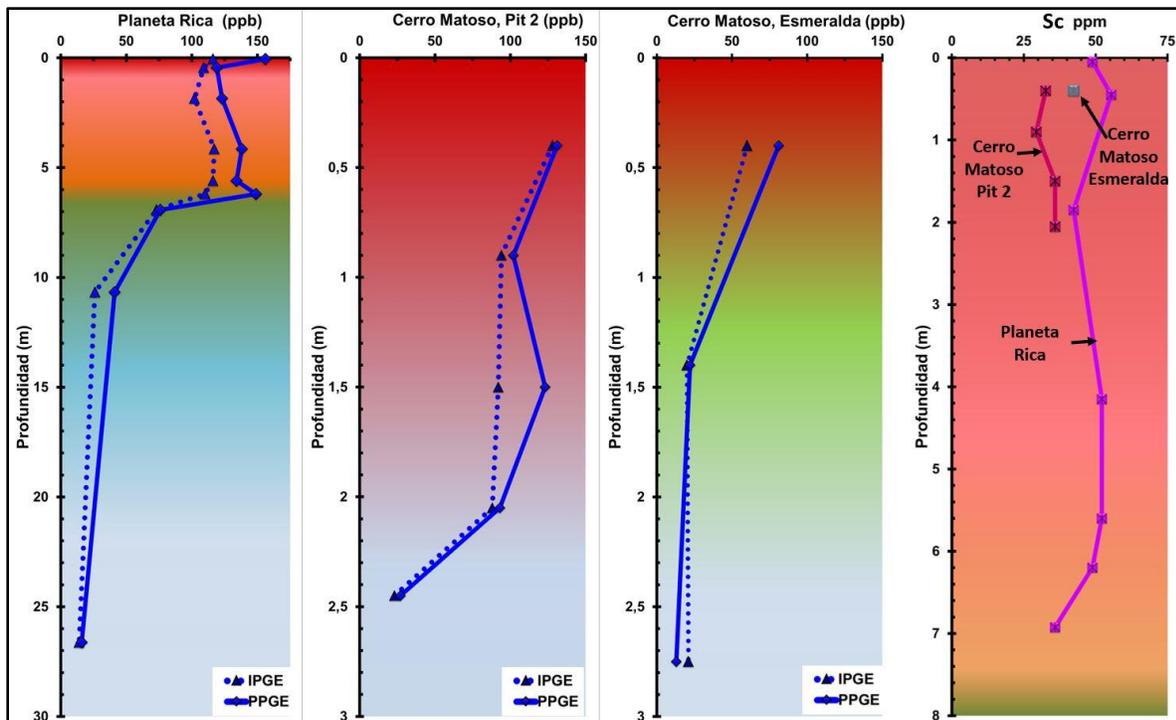
4.3 Diagramas de comparación entre Cerro Matoso y Planeta Rica

La comparación del contenido de IPGE vs PPGE de los tres perfiles analizados, dos de Cerro Matoso y uno de Planeta Rica se presenta en la **Figura 4-7**. Se puede observar, que los mayores contenidos de EGP se concentran hacia la zona limonítica y presentan un fuerte empobrecimiento en el horizonte saprolítico y la peridotita saprolitizada. Además, el contenido de los IPGE es menor respecto a los PPGE, pero el comportamiento de ambos grupos de elementos es muy similar a lo largo del perfil de meteorización a excepción del perfil de Cerro Esmeralda (CMM-01) en Cerro Matoso ya que cuando pasa del saprolito a la roca, el contenido de IPGE es mayor que el de los PPGE, y corresponde a un contenido más alto de IPGE (21 ppb) respecto a PPGE (13 ppb). Los picos más altos de acumulación de los EGP se

encuentran en el primer intervalo de los perfiles (zona limonítica) y en la zona de transición de la limonita a saprolito, aunque se resalta que el contenido de PPGE en Planeta Rica está por encima de los 119 ppb respecto a los de Cerro Matoso, que está en un rango entre 81 y 131 ppb. El perfil de Planeta Rica presenta los contenidos más altos de Pt y Pd de los tres perfiles analizados en la zona limonítica (58 – 83 ppb de Pt y 47-74 ppb de Pd, ver **Tabla 4-1**).

Sólo se registraron concentraciones de Sc en la zona limonítica de los 3 perfiles, en donde los valores más altos se registraron en Planeta Rica con un promedio de 48 ppm respecto a 35ppm en Cerro Matoso.

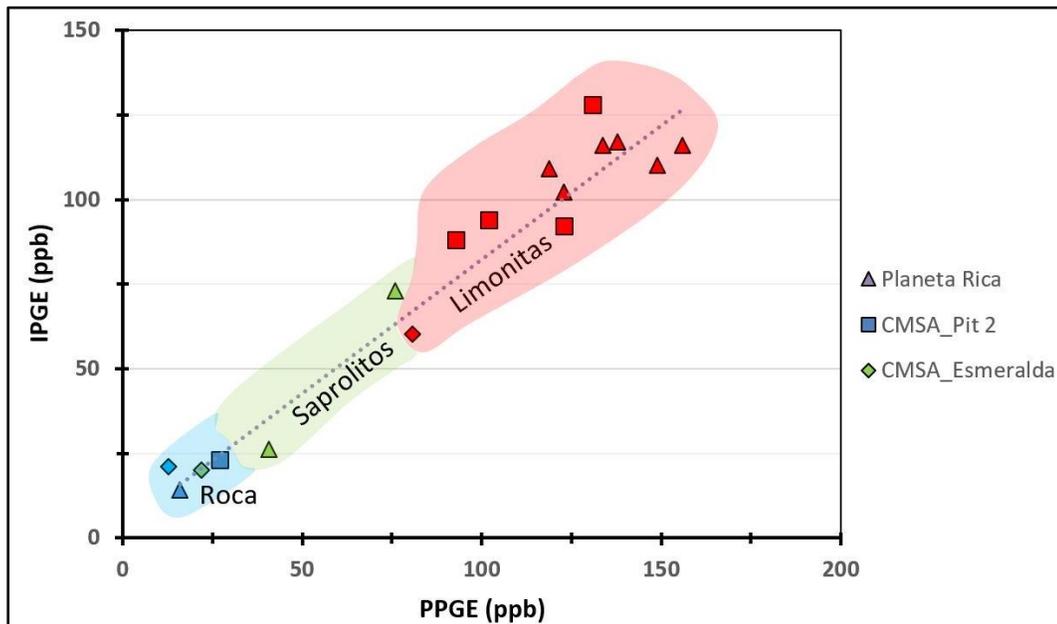
Figura 4-7. Comparación del contenido de IPGE (Os+Ir+Ru) vs PPGE (Pt+Pd+Rh) y Sc en los perfiles lateríticos de Cerro Matoso y Planeta Rica.



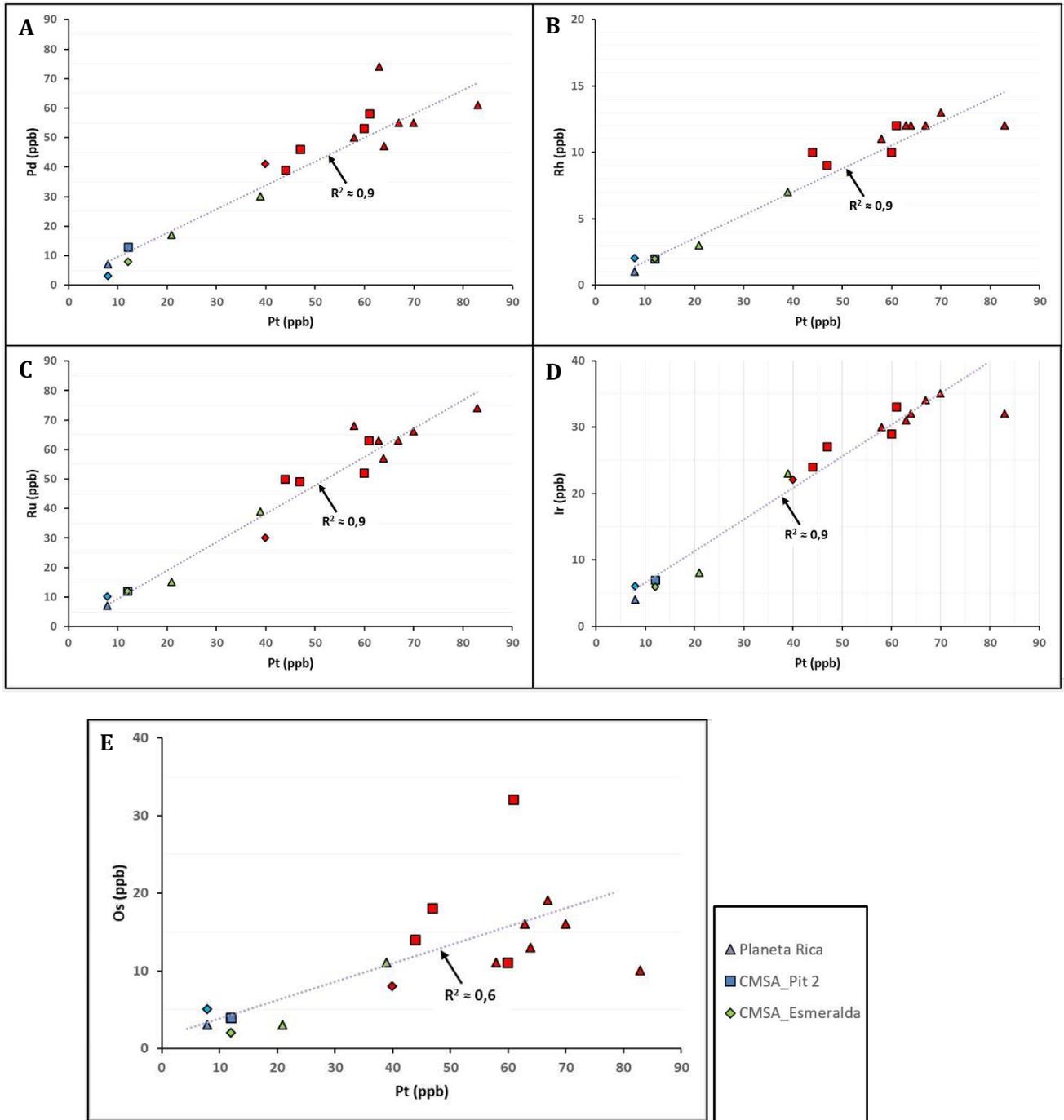
En el diagrama de correlación IPGE vs PPGE se observa que tanto en los perfiles de Cerro Matoso como de Planeta Rica (**Figura 4-8**) hay una buena correlación positiva entre ambos subgrupos, el cual se mantiene a lo largo de todo el perfil de meteorización. Por otra parte, las relaciones IPGE/PPGE para los tres perfiles analizados son menores a 1 (~ 0.88) (**Tabla 4-1**), lo que indica que las concentraciones de PPGE > IPGE a excepción de la relación IPGE/PPGE en la zona de peridotita saprolitizada de Cerro Esmeralda en Cerro Matoso, en donde la relación es de 1,615 debido a que el contenido de IPGE en esta zona es mayor que PPGE, como ya se había dicho al inicio de este subcapítulo.

La correlación observada en el diagrama IPGE vs PPGE también se refleja en los diagramas binarios de Pt versus (Pd, Rh, Ru e Ir) (**Figura 4-9**), en donde hay una notable correlación positiva entre estos elementos en todo el perfil de meteorización, con un R^2 ⁴ casi igual a 1, lo que indica que hay un ajuste lineal casi perfecto entre los pares de elementos comparados y que hay una clara afinidad entre ellos, sin embargo, los valores de las relaciones Pt/Pd y Pt/Ru son los más cercanos a 1 respecto a los demás pares analizados (**Tabla 4-1**), lo que significa que las concentraciones de Pt, Pd y Ru son muy similares entre sí (aprox. 60 ppb). Lo anterior no se aplica para el diagrama Pt vs Os (**Figura 4-9 E**), dado que el R^2 es igual a 0,6, lo que significa que no hay una representatividad entre Pt y Os confirmado con los valores de Pt/Os muy por encima de 1 (en promedio 4,2 y llegando hasta valores de 8) y concentraciones de Pt hasta 3 veces más alta que Os.

Figura 4-8. Diagrama de correlación IPGE/PPGE entre Cerro Matoso (CMSA) y Planeta Rica.



⁴ R^2 : coeficiente de determinación en un modelo de regresión lineal, el cual mide la proporción de variabilidad total de la variable Y.

Figura 4-9. Diagramas de correlación: A) Pt vs Pd. B) Pt vs Rh. C) Pt vs Ru. D) Pt vs Ir. E) Pt vs Os.

4.4 Diagrama de comparación entre los perfiles lateríticos de Cerro Matoso, Planeta Rica (Colombia), República Dominicana y Cuba

En la **Figura 4-10**, se compara el contenido de IPGE y PPGE en los perfiles lateríticos de Cerro Matoso y Planeta Rica (Colombia), respecto a los valores registrados por Aiglsperger et al., (2016) en los depósitos de níquel Moa Bay (Cuba) y Falcondo (República Dominicana).

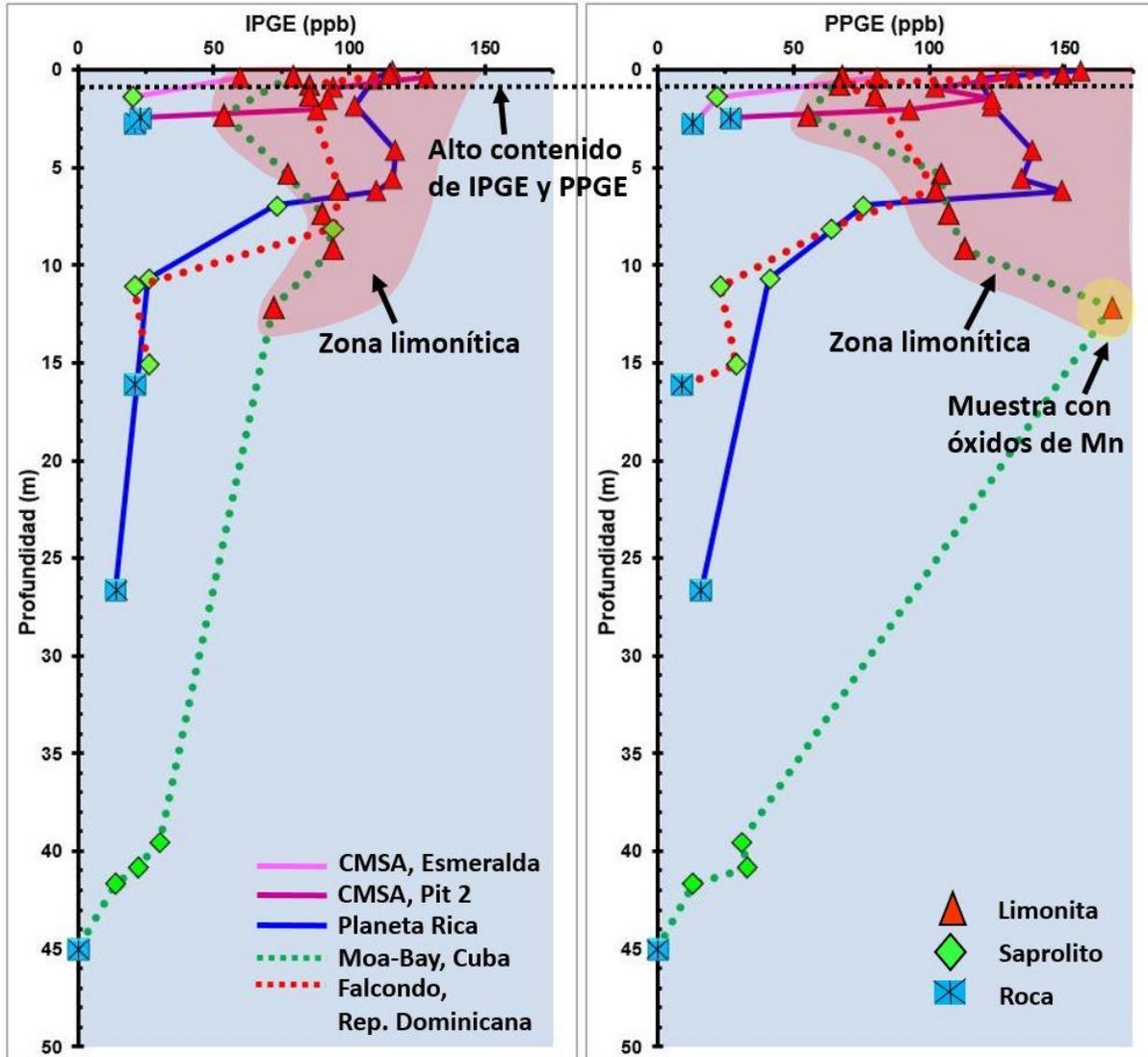
A grandes rasgos se observa que el patrón de comportamiento de concentración de IPGE y PPGE en los perfiles lateríticos de Colombia, Cuba y República Dominicana es bastante similar, incluso en el contenido de EGP ya que éstos se concentran de manera preferente en la zona limonítica con valores entre 50 y 160 ppb aproximadamente para cada subgrupo, entre 10 y 90 ppb en la zona saprolítica y valores a < 25 ppb en la roca.

Del mismo modo, se observa que los mayores picos de acumulación de dichos elementos se encuentran en el nivel más superior de los perfiles de meteorización y en la zona de transición de laterita a saprolito. Se destaca que en general, el contenido de PPGE es mayor a los IPGE en todos los casos y que tanto el contenido de IPGE y PPGE en el perfil de Planeta Rica es hasta 25 ppb más alto respecto a los demás perfiles analizados.

Sin embargo, el intervalo de transición de laterita a saprolito del perfil de Moa Bay (Cuba), tiene el valor más alto de PPGE (≈ 165 ppb), el cual corresponde a una muestra con alto contenido de óxidos de Mn (4,24 wt%, muestra Mn 3, Tabla 1 de Aiglsperger et al., (2016), p.134) y de acuerdo a los autores, se detectó Pt dentro de óxidos de Mn formados in-situ y los patrones de EGP normalizados a la condrita mostraron una anomalía positiva de Pt para la misma muestra, por cuanto una de las conclusiones más destacadas de ese estudio es que los EGP se concentran en zonas específicas como las de óxidos de Fe y Mn. En el caso de las muestras de Cerro Matoso y Planeta Rica, los mayores valores de MnO no superan el 1,44 wt% (**Tabla 4-1**), aunque podría haber una relación similar a la muestra Mn 3 de Cuba, ya que en los intervalos donde el contenido de MnO es mayor a 1 wt%, el contenido de Pt y Pd es alto respecto a los demás intervalos. Sin embargo, no es una relación totalmente correspondiente, porque en los niveles PR-1136-LA y PR-1136-LA-SC del perfil PR-1136 de Planeta Rica (**Tabla 4-1**) tienen uno de los contenidos más altos de Pt (70 y 67 ppb, respectivamente) y el contenido de MnO es bajo (0,44 y 0,67 wt%, respectivamente).

Los altos valores en PPGE se deben principalmente a una alta concentración de Pt y Pd en los niveles superiores de los perfiles de meteorización.

Figura 4-10. Comparación del contenido total de IPGE y PPGE en los depósitos de Cerro Matoso (CMSA) y Planeta Rica (Colombia), respecto a los valores registrados por Aiglsperger et al., (2016) en los depósitos de Moa Bay (Cuba) y Falcondo (República Dominicana).



5. Capítulo 5: Mineralogía de los MGP

La selección de la muestra para hidroseparación, se basó en los resultados obtenidos a partir de los análisis químicos de los tres perfiles lateríticos y de su contenido total de EGP:

Como ya se dijo en el Capítulo 4 de geoquímica, la sumatoria de EGP más altos corresponden al pozo **PR-1136 (250 a 272 ppb)** y en segundo lugar al perfil **CMM-03 (196-259 ppb)**. Las muestras del Cerro Esmeralda (CMM-01), al Noroeste de la zona de explotación de Cerro Matoso, mostraron los contenidos de EGP más bajos de todas las muestras analizadas, donde contenido total de EGP más alto es de 141 ppb en la laterita y los contenidos de Pd y Pt no superan los 40 ppb. Por tanto se descartó este perfil para aplicar la técnica de hidroseparación.

Entre los perfiles PR-1136 y CMM-03, se seleccionó el primero ya que los mayores contenidos de EGP también se registraron en dos de sus niveles (**259 ppb y 272 ppb**). Se seleccionó la muestra **PR-1136-SC** (Planeta Rica) que corresponde a la zona de transición entre las lateritas y el saprolito verde (área de discontinuidad de Mg en este perfil), ya que tiene uno de los contenidos de EGP más altos (259 ppb) de todas las muestras analizadas por geoquímica, así mismo contiene uno de los valores más altos de MnO (1,29 wt%) y Co (0,199wt%), los cuales resultan ser un buen indicativo de concentración de EGP, ya que el Mn y el Co parecen tener una correspondencia con estas zonas de acumulación (Ndjigui & Bilong, 2010; Aiglsperger et al., 2016). Además, la muestra que contiene 272 ppb de EGP sólo había disponible alrededor de 500 g, lo cual no es una cantidad suficiente para aplicar el proceso de separación por minerales densos con la técnica de hidroseparación.

Como resultado del proceso de hidroseparación de minerales densos de la muestra **PR-1136-SC**, se obtuvieron 6 fracciones finas: >125, 125-100, 100-75, 75-50, 50-30 y <30 μm .

Dado que los resultados de los análisis químicos arrojaron valores de EGP muy bajos y que el tamaño de la muestra para el proceso fue de tan solo 1,1 Kg⁵; se seleccionaron las fracciones más finas (50-30 y <30 μm) para llevarlos al equipo de hidroseparación de la Universidad de

⁵ La recomendación del tamaño de muestra para aplicar el proceso de hidroseparación de minerales densos es de mínimo 2.7Kg (Navarro-Ciurana et al., 2012), sin embargo, como se mencionó en el capítulo 2 de trabajo de campo, las muestras de este perfil corresponden a un pozo de perforación del cual sólo se permitió tomar la mitad del núcleo por parte de la empresa South 32 Ltd.

Barcelona, con el objetivo de estudiar la existencia de las fases minerales de los platinoides a estas escalas.

5.1 MPG en zona de transición del horizonte limonítico con el saprolito

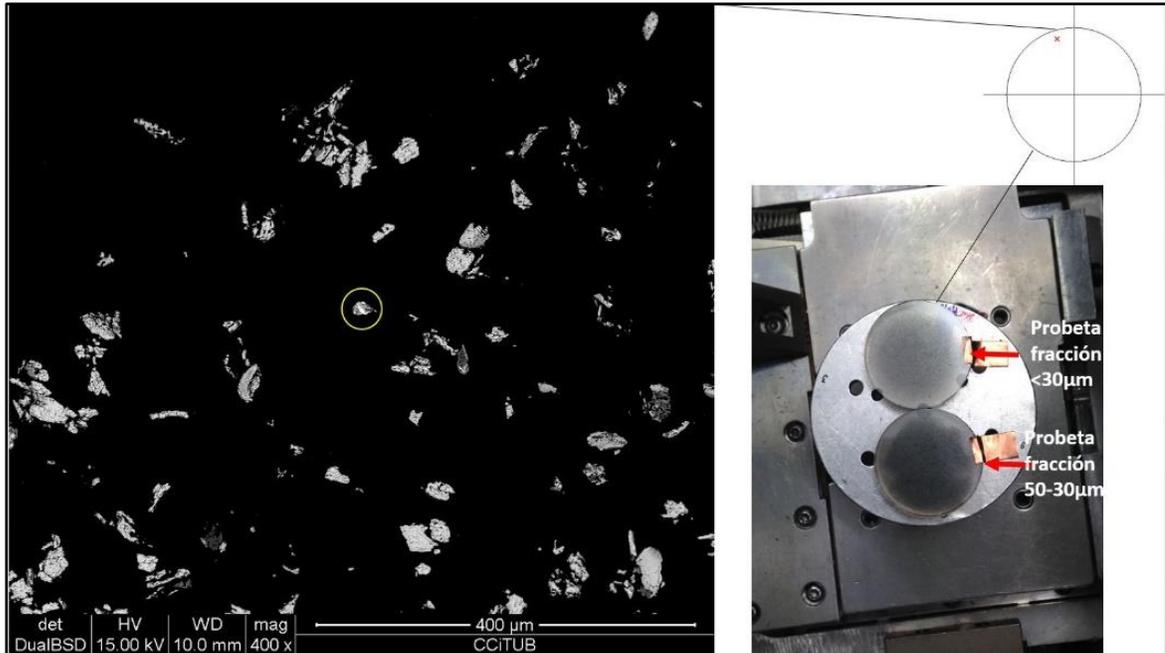
De las dos fracciones estudiadas (50-30 y <30 μm) se encontró un grano de mineral del grupo del platino (MGP) y partículas de pirita neoformadas con probables platinoides en los intersticios de los cristales, restringidas a la fracción <30 μm .

En la **Figura 5-1** se puede observar el grano de MGP encontrado y que corresponde a una aleación metálica de Pt-Ir-Fe-Ni incluido en el centro de un oxi-hidróxido de Fe, presenta alta reflectividad electrónica, tiene una forma subhedral elongada, gruesa, bordes irregulares y superficie rugosa. El tamaño del grano es de 8 μm en el eje alargado y de 3 μm en el eje corto (**Figura 5-1 C**).

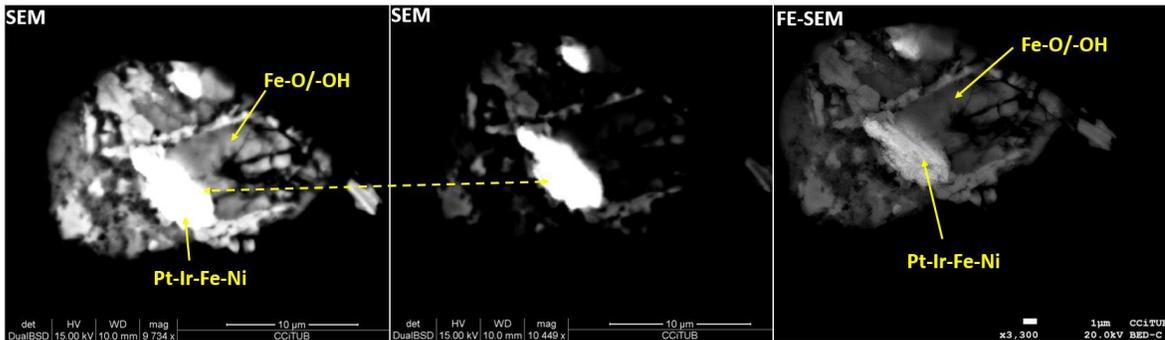
En la **Figura 5-2** se pueden observar cristales de pirita interagregados con una textura framboidal, muy porosa y en cuyos intersticios se forman diminutos cristales entre 0,1 y 1 μm de alta reflectividad, de muy probable platinoide, sin embargo por su tamaño tan pequeño no fue posible obtener espectro de rayos X por SEM-EDS.

Las formas y ocurrencia de estos granos sugieren una formación secundaria, ya que las formas típicas de cristales primarios o de origen ígneo, son por lo general euhedrales con secciones poligonales que no han sufrido abrasión (Bowles, 1986; Ndjigui & Bilong, 2010; Aiglsperger et al., 2015; González-Jiménez et al., 2014; Farré De Pablo et al., 2017).

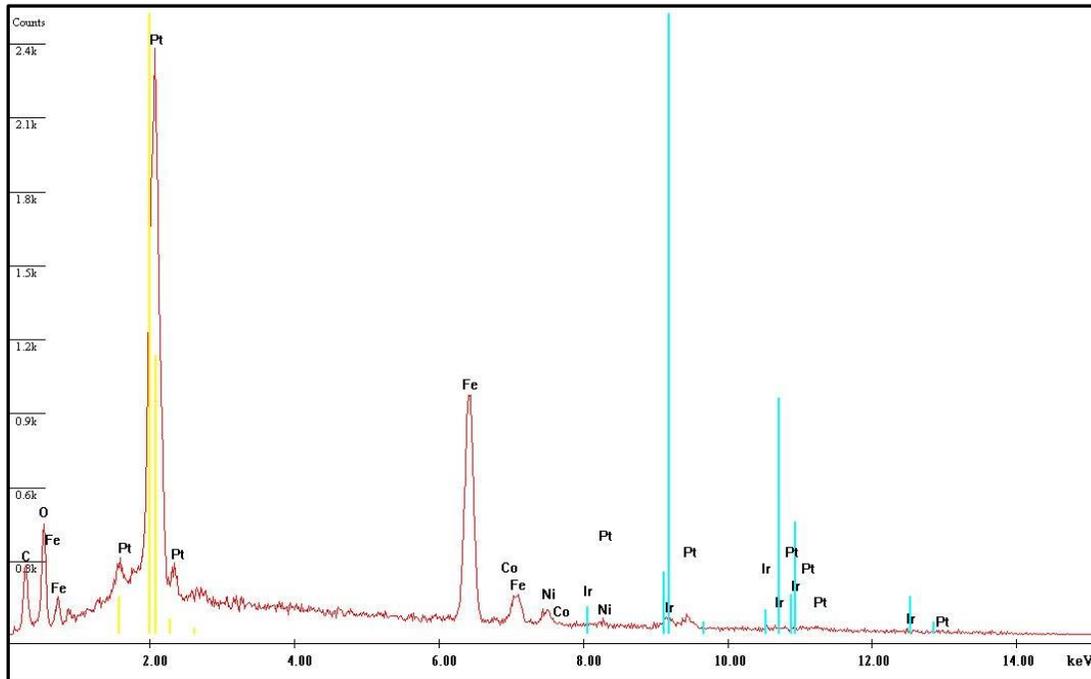
Figura 5-1. Imágenes de barrido de electrones retrodispersados (BSE, Back-Scattered Electrons) por SEM y FE-SEM del MGP encontrado en la muestra PR-1136-SC de Planeta Rica.



A) Imagen BSE de concentrado de minerales pesados y en el centro se observa un grano de MGP con alta reflectancia. La imagen de la derecha corresponde a las probetas analizadas.

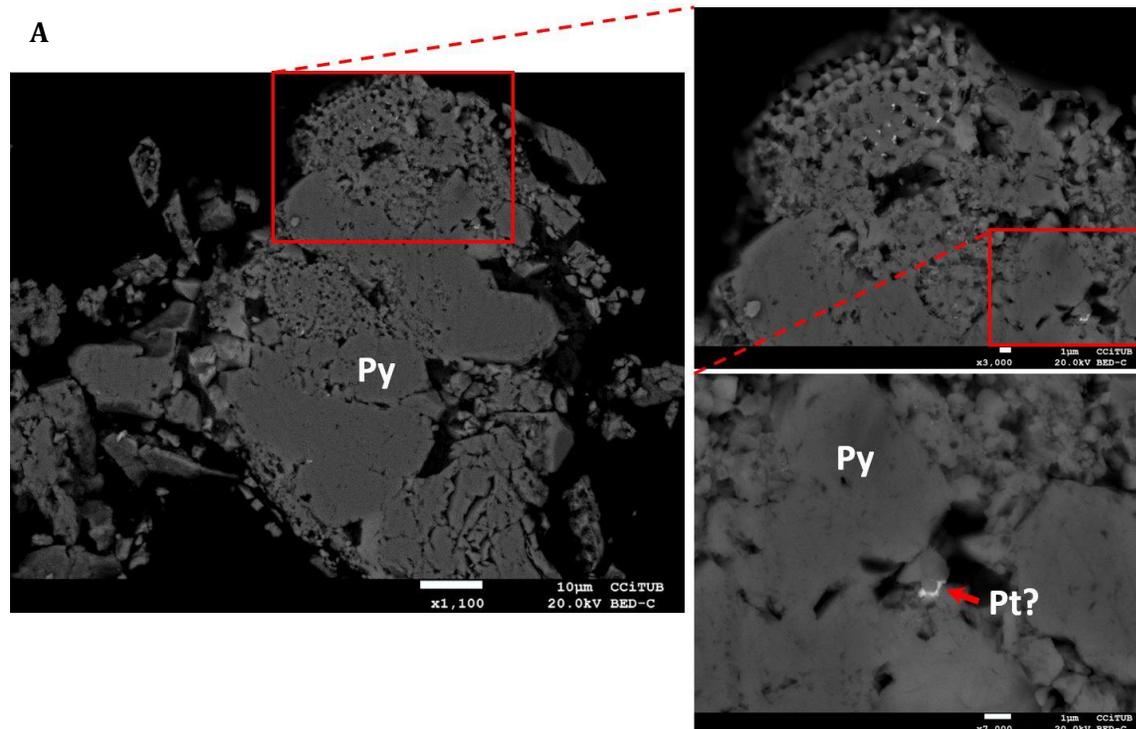


B) Imágenes BSE de un MPG compuesto de Pt-Ir-Fe-Ni incluido dentro de un óxi-hidróxido de Fe (Fe-O/-OH).

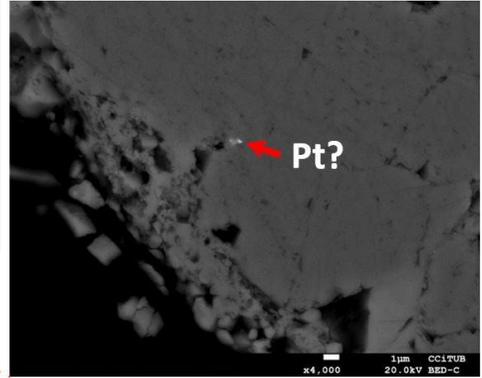
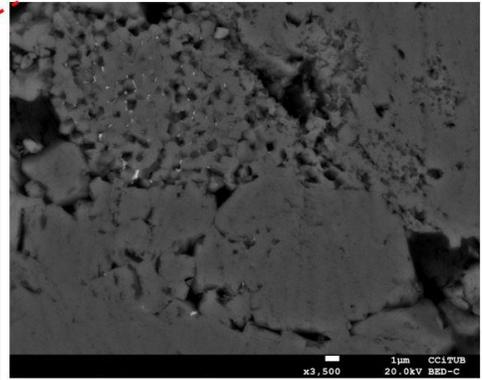
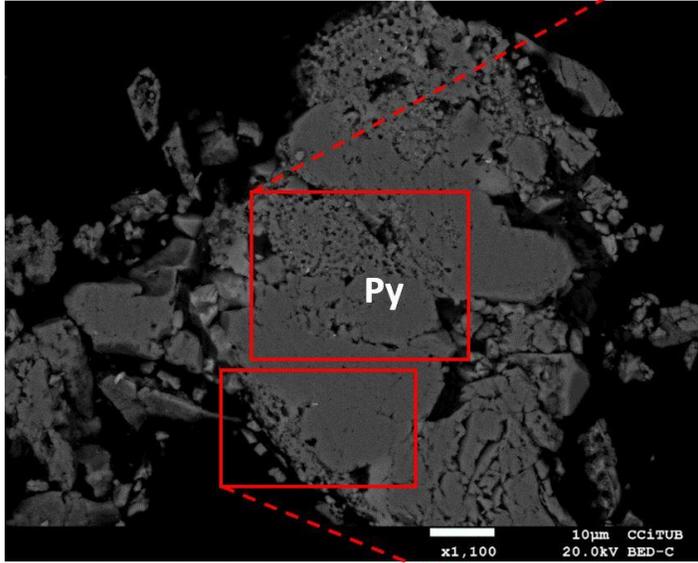


C) Espectro de rayos X obtenido por SEM-EDS mostrando aleación metálica Pt-Ir-Fe-Ni. Los pequeños picos de C y O presentes en el espectro provienen del recubrimiento en carbono que se le hace a la probeta.

Figura 5-2. Imágenes BSE por FE-SEM de las partículas de pirita (Py) neoformadas con microcristales de alta reflectancia de posibles platinoideos en los intersticios de los cristales en la muestra PR-1136-SC de Planeta Rica.



B



6. Capítulo 6: Discusión

6.1 Perfil litogeoquímico de Cerro Matoso y Planeta Rica

Los patrones litogeoquímicos de Fe_2O_3 , MnO , Co_3O_4 y Cr_2O_3 del perfil CMM-01 de Cerro Matoso y el perfil PR-1136 de Planeta Rica, presentan sus mayores concentraciones en el horizonte de la limonita (>60 wt%, >0,6 wt%, >0,2 wt% y >1,5 wt%, respectivamente) y justo en la zona de transición entre la laterita roja y el saprolito verde (discontinuidad de Mg) hay una fuerte disminución de sus porcentajes hasta llegar a los valores más bajos en la roca. El comportamiento inverso ocurre con los contenidos de SiO_2 y MgO , los cuales pasan de valores aproximados de 40 wt% de SiO_2 y 38 wt% de MgO en la roca a valores <6 wt% de SiO_2 y <3 wt% de MgO en la zona de discontinuidad de Mg.

Este comportamiento químico en el perfil de meteorización de las lateritas niquelíferas de Cerro Matoso y Planeta Rica, es característico de un depósito de silicato de Mg hidratado. Este último se caracteriza por mostrar un patrón químico con una fuerte concentración residual de Fe, Al, Cr, Mn y Co en el horizonte limonítico y un agotamiento abrupto de éstos elementos en los horizontes de saprolito y de peridotita. Contrario al comportamiento de la Si y Mg que presentan los valores más altos hacia la roca respecto a la zona de limonitas, ya que a medida que se va meteorizando la roca, estos elementos se van lixiviando (Cornwall, 1966; Brand et al., 1998; Freyssinet et al., 2005; Aiglsperger et al., 2016).

Otro rasgo importante de los depósitos de tipo silicato de Mg hidratado es que el horizonte de mena se ubica por debajo de la zona de discontinuidad de Mg. (Brand et al., 1998; Freyssinet et al., 2005). En Cerro Matoso y Planeta Rica los porcentajes de NiO son altos (>2wt%) y se concentran hacia el horizonte saprolítico, lo cual es congruente en este tipo de depósitos.

El patrón geoquímico de los elementos mayores y menores relevantes de los perfiles analizados es comparable con otros depósitos lateríticos de Ni en el mundo, tales como en República Dominicana, Nueva Caledonia, Grecia, Los Urales, Indonesia y Filipinas (Brand et al., 1998; Gleeson et al., 2003; Freyssinet et al., 2005; Aiglsperger et al., 2016).

Por otra parte, el perfil CMM-03 de Cerro Matoso ubicado en el pit 2 al SW de la Mina (**Figura 1-4**) desarrolla una laterita roja de muy alto hierro (>60 wt%), con contenidos de NiO de hasta 1,8 wt% y Cr_2O_3 de hasta 3,7 wt%, los cuales son casi un 1 % mayor respecto a los contenidos

de NiO y Cr₂O₃ en las limonitas de los perfiles CMM-01 y PR-1136. De acuerdo a análisis microscópico, termodiferencial y termogravimétrico de un estudio de caracterización mineralógica de este depósito realizado por la empresa SUMICOL S.A (2002), el material laterítico del pit 2 tiene más del 65% de oxi-hidróxidos de Fe de tipo goethita. De acuerdo a autores como Brand et al. (1998); Freyssinet et al. (2005); Gleeson et al. (2003) y Proenza (2015), un depósito tipo óxido está presente en todos los ambientes climáticos y se caracteriza por tener una capa entre el pedolito y el saprolito dominada por oxi-hidróxidos de hierro (e.g goethita) al cual está asociado el Ni, bajos contenidos de Si y Mg, alto Fe (>40%) y altas concentraciones de Cr y Al en esta zona. Con base a lo anterior, el perfil CMM-03 (**Figura 4-1 B y Tabla 4-1**) tiene características geoquímicas y mineralógicas de un depósito de este estilo. De manera adicional, Brand et al. (1998) señala que la mayoría de los depósitos de laterita de Ni contienen zonas de tipo silicato hidratado de Mg y tipo óxido, en diferentes proporciones.

Por tanto, el depósito de Cerro Matoso aunque es dominado por un tipo silicato de Mg hidratado como lo indican los diferentes autores (Castro, 1987; Gleeson et al., 2004) y los resultados de esta investigación, contiene algunas áreas características de un depósito tipo óxido.

6.2 Enriquecimiento de los EGP en las lateritas de Cerro Matoso y Planeta Rica

En los tres perfiles analizados los mayores contenidos de EGP se concentran hacia la zona limonítica, principalmente en las zonas de canga y transición laterita-saprolito y presentan una fuerte disminución en el horizonte saprolítico y la peridotita saprolitizada, con contenidos totales de EGP que varían entre 141 y 272 ppb en el horizonte limonítico, 42 a 149 ppb en el saprolito y valores < 50ppb en la roca. En general, las concentraciones más altas corresponden a Pt>Ru>Pd y las más bajas a Ir>Os>Rh, con concentraciones muy similares entre cada subgrupo. En Planeta Rica las concentraciones de Pt, Ru y Pd en limonita están entre 47 y 83 ppb y en Cerro Matoso se encuentran entre 30 y 63 ppb.

Estos perfiles se caracterizan por tener contenidos altos en PPGE (hasta 156 ppb) y bajos de IPGE (hasta 128 ppb), marcados por una relación IPGE/PPGE de aproximadamente 0,88, lo que indica que las concentraciones de PPGE>IPGE. Una excepción es la relación IPGE/PPGE en la zona de peridotita saprolitizada de Cerro Esmeralda en Cerro Matoso, en donde la relación es de 1,615 debido a un mayor contenido de IPGE en la roca de 21ppb respecto a 13ppb de PPGE.

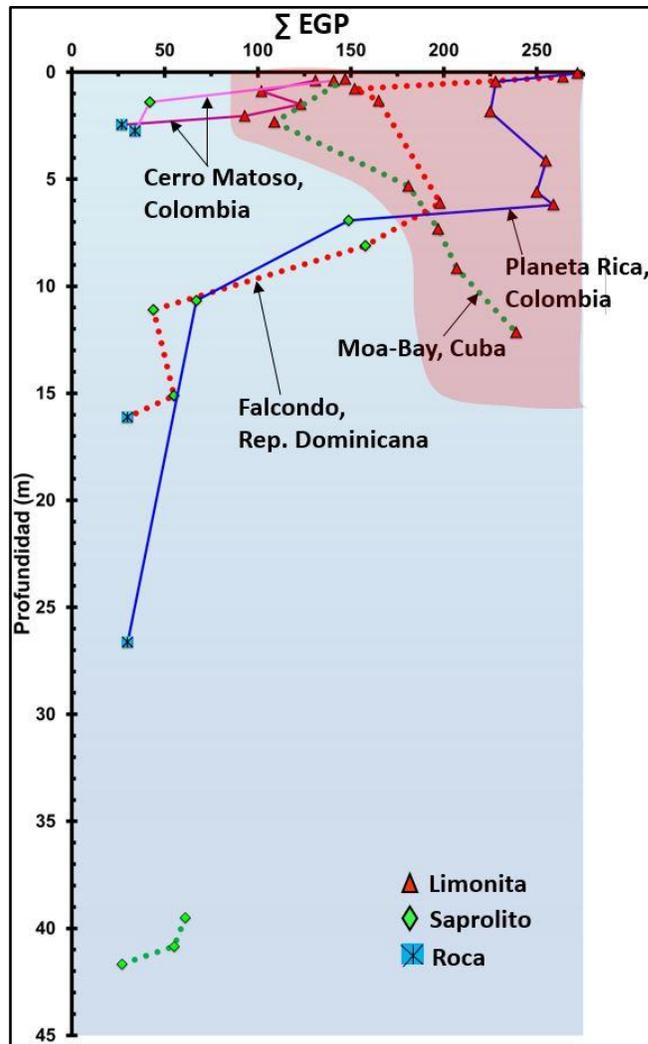
Las altas concentraciones de EGP hacia los niveles superiores del perfil de meteorización respecto a las concentraciones iniciales en la roca y las correlaciones positivas entre ellos, indican que los EGP son movilizados en diferentes proporciones, siendo más móviles Pt, Ru y Pd respecto a Ir, Os y Rh. La movilidad de los EGP puede estar relacionada a los procesos de laterización que favorecen la movilización de estos metales con la subsecuente concentración de ellos en los niveles limoníticos (Plimer & Williams, 1987; Eliopoulos & Economou-

Eliopoulos, 2000; Ndjigui & Bilong, 2010; Aiglsperger et al., 2015), afectados por las relaciones Eh-pH, concentraciones cloradas de agua en el suelo y el modo de ocurrencia de los EGP en la roca antes de la meteorización (Fuchs & Rose, 1974; Bowles, Gize & Cowden, 1994; Salpéteur, Martel-Jantin & Rakotomanana, 1995). Varios estudios revelan que el Pt y el Pd son elementos sensibles a los ambientes redox y pueden ser movilizados como complejos inorgánicos a bajas temperaturas (Cabral et al., 2011). Soluciones ricas en Cl a baja temperatura favorecen la movilidad del Pt y Pd, aunque una alta movilidad del Pt requiere además condiciones ácidas (pH<6) (Fuchs & Rose, 1974; Plimer & Williams, 1987; Salpéteur et al., 1995; Gammons, 1996). Estas condiciones en el suelo, también pueden conducir a disolución de EGP y su subsecuente diferenciación, migración y acumulación en perfiles oxidados (Plimer & Williams, 1987; Bowles, Gize & Cowden, 1994) y co-precipitación de aleaciones ricas en estos metales con óxidos de hierro y manganeso (Bowles, Gize & Cowden, 1994; Ndjigui & Bilong, 2010 y referencias contenidas). Los ácidos húmicos pueden concentrar EGP en rocas cuyos contenidos de estos elementos son muy bajos (Bowles, Gizé, Vaughan & Norris, 1994).

Las altas concentraciones de EGP en la zona limonítica son comparables con las lateritas niquelíferas del depósito tipo óxido en Moa – Bay, Cuba y el depósito de silicato hidratado de Mg en Falcondo, República Dominicana (**Figura 6-1**), en donde los EGP también se enriquecen en la limonita con valores del orden de 109 a 264 ppb, y con valores en el saprolito de 27 a 61 ppb y valores < 30 ppb en la roca (Aiglsperger et al., 2016).

También se observa que los mayores picos de acumulación de dichos elementos se encuentran en el nivel más superior de los perfiles de meteorización y en la zona de transición de laterita a saprolito. Se destaca en general que el contenido total de EGP es mayor en el perfil de Planeta Rica hasta 50 ppb más alto respecto a los demás perfiles analizados, lo cual se manifiesta en una alta concentración de Pt y Pd en la zona limonítica.

Figura 6-1. Comparación del contenido total de EGP en los depósitos de Cerro Matoso y Planeta Rica (Colombia), respecto a los valores registrados por Aiglsperger et al., (2016) en otros depósitos del Caribe.



6.2.1 Relevancia económica de los Elementos del Grupo del Platino en Cerro Matoso y Planeta Rica

Aunque la concentración total de EGP en la zona limonítica de Cerro Matoso y Planeta Rica es menor a 300 ppb, este valor es comparable con el contenido total de EGP reportado por Aiglsperger et al., (2015, 2016) en el yacimiento de laterita de Ni de Falcondo en República Dominicana, que registra valores entre 250 y 640 ppb en el mismo horizonte de meteorización y lo consideraron como un depósito potencial no convencional de EGP, ya que demostraron que el producto final de Falcondo (es decir, cono de ferroníquel a partir de la extracción pirometalúrgica) tuvo un incremento sustancial en el contenido total de EGP de más de 2 ppm.

De manera adicional, Lazarenkov, Tikhomirov, Zhidkov y Talovina (2005) citados por Aiglsperger et al., (2016) demostraron que en las plantas de tratamiento mineral de Nikaro y Moa (principales productores de Ni en Cuba), los MGP se estaban perdiendo en los relaves, concentrados de sulfuro y productos finales de Ni con contenidos de EGP de 2 a 6 ppm en concentrados de sulfuro. Según sus estimaciones, se podría extraer de los concentrados cerca de 800 kg/año de éstos metales.

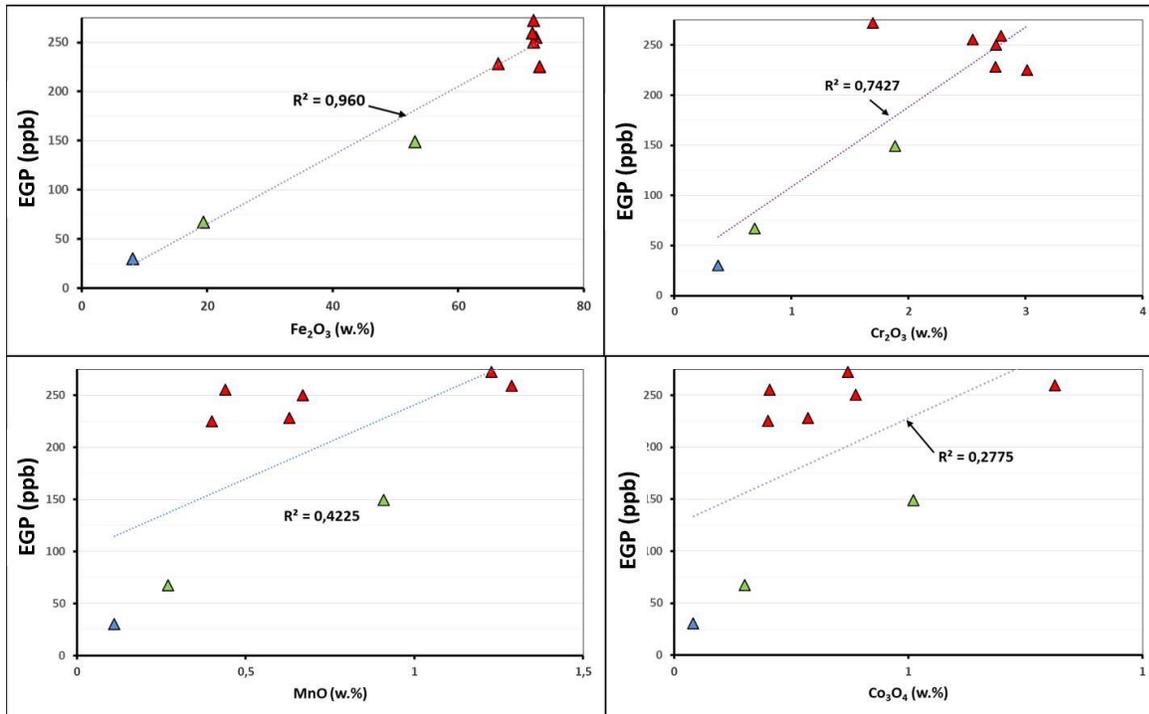
Por otra parte, la Corporación canadiense CVMR inició en el 2006 un proceso de tecnificación y mejora del método Carbonyl para la extracción directa de Ni y Fe de diferentes tipos de menas de limonita y saprolito que además tuvieran otros metales como Cu, Co y EGP (Terekhov & Nanthakumar, 2013). Para ello, tomaron varias muestras de África Central, entre ellas, una presentaba contenidos iniciales en limonita de 1,1% Ni, 44% Fe, 0,14% Co, 0,4% Cu y 1,7ppm EGP y con la aplicación del método de carbonilización hubo una tasa de recuperación de Ni y Fe de más del 99%. Sin embargo, de los resultados más destacados de dicho estudio es que durante el proceso de extracción secundaria, con la aplicación de separación magnética y gravimétrica sobre los residuos de la extracción de Ni y Fe, las concentraciones de los EGP se incrementaron de una base de casi 2ppm a 30ppm. Según los autores, sería posible producir cerca de 1,7 tpa (toneladas por año) de EGP, 2800 tpa de Cu y 816 tpa de Co a partir de un estándar de 1 millón de toneladas por año de mena de limonita (Terekhov & Nanthakumar, 2013).

Lo anterior conduce a que la aplicación de métodos de refinación adecuados en la mena de interés tiene ventajas tanto a nivel operativo como económico, y la obtención de subproductos como Co, Cu y EGP en lateritas de Ni pueden crear un flujo de caja positivo para la operación minera y aumentar la viabilidad de un proyecto.

6.3 MGP en el perfil laterítico de Ni de Planeta Rica

Las mayores concentraciones de EGP en el perfil de meteorización de Planeta Rica se encuentran hacia la zona limonítica, caracterizada por un dominio de fases de oxi-hidróxidos de Fe evidenciada por contenidos elevados de Fe_2O_3 (>70wt%). Lo anterior conlleva a analizar la correlación entre los EGP respecto a los contenidos de Fe y de manera adicional, su correlación con los contenidos de MnO , Cr_2O_3 y Co_3O_4 , dado que estos elementos también se encuentran enriquecidos en dicha zona (**Figura 4-4**).

En la **Figura 6-2**, se puede observar que los EGP presentan una buena correlación positiva con el contenido de Fe a lo largo de todo el perfil de meteorización, presentando valores más altos a medida que aumenta el contenido de Fe_2O_3 y la variabilidad de los EGP respecto al Fe_2O_3 es <4%. Caso contrario a lo que ocurre en la relación EGP vs MnO y Co_3O_4 , en donde hay una clara dispersión de los datos y no hay un ajuste correlacionable entre los elementos comparados ($R^2=42\%$ y 27% , respectivamente). Similar a lo ocurrido con el MnO y Co_3O_4 , sucede entre los EGP y Cr_2O_3 , en donde la correlación es de tan sólo el 74%.

Figura 6-2. Diagramas de correlación entre los EGP y Fe_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 y Co_3O_4 .

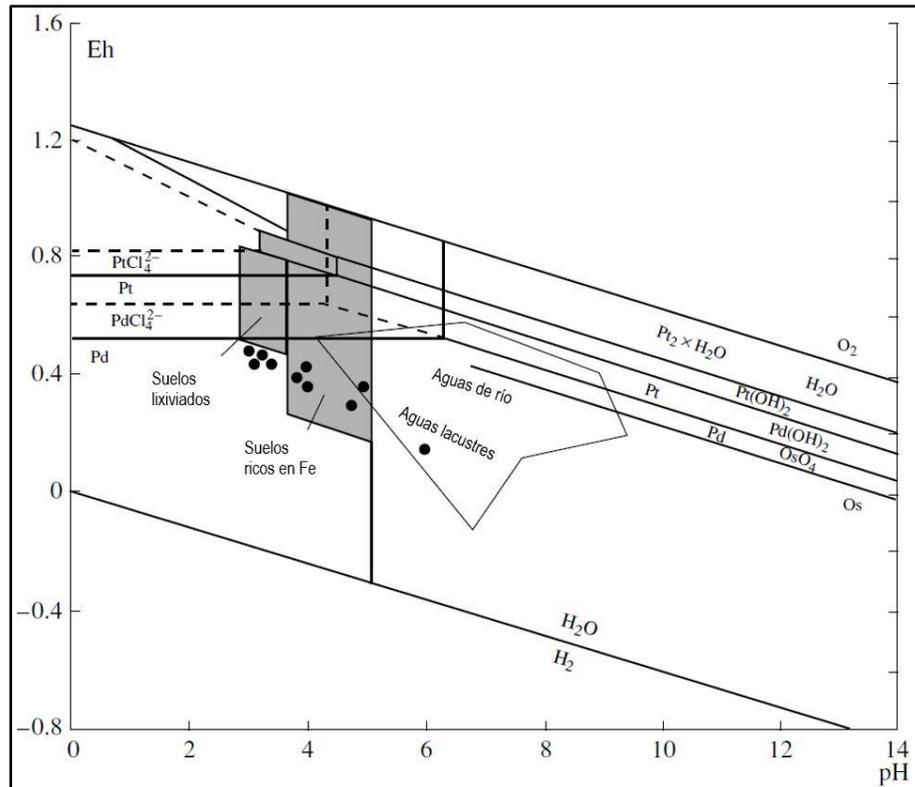
Lo anterior muestra que hay una mayor afinidad entre los EGP y el Fe, lo cual favorece la formación de aleaciones minerales de EGP-Fe. Observaciones similares realizadas por Oberthür y Melcher (2005) y Ndjigui y Bilong (2010), indican que altas concentraciones de Pt, Pd y Ru podrían ser situadas en minerales secundarios como oxi-hidróxidos de Fe o esmectitas y que además, metales de transición tales como Ni, Co, Cu y Zn también pueden ser incorporadas en la estructura de las fases minerales de Fe (Ndjigui y Bilong, 2010 y referencias contenidas).

Estas hipótesis pueden ser demostradas en la laterita de Planeta Rica, ya que se encontró un grano de MGP como inclusión en un oxi-hidróxido de Fe en la zona de transición entre el horizonte limonítico y el saprolítico en Planeta Rica (**Figura 5-1**). Este MPG presenta una aleación compleja de Pt-Ir-Fe-Ni y es considerado de origen secundario, evidenciado además por su morfología irregular la cual es comparable con otros MGP encontrados en las lateritas del Caribe, tales como las aleaciones Ir-Ru-Os-Pt-Fe-Ni / Pt-Fe-Ni / Ru-Ir incluidos en cristales de cromo-espinelas, awaruita y oxi-hidróxidos de Fe en el depósito de Loma Peguera (Falcondo, República Dominicana) (Aiglsperger et al., 2015).

Por otra parte, al considerar que los EGP son altamente siderófilos (O'Driscoll & González-Jiménez, 2016) y que algunos estudios experimentales han mostrado que el Pt y el Pd son movilizados durante la oxidación de la pirita bajo co-ordinaciones apropiadas (Plimer & Williams, 1987), se considera que las partículas <1 μm de muy alta reflectancia en SEM

encontradas en este estudio como inclusiones en los intersticios de agregados de pirita neoformada corresponden a platinoideos y estarían indicando neoformación de nanopartículas de platinoideos que fueron adheridos a los bordes porosos de la pirita. Estos EGP muy probablemente fueron transportados en solución bajo condiciones ácidas (pH<6) y alto Eh (>0.4) en suelos ricos en Fe, según muestra el diagrama Eh-pH para el sistema Pd-Pt-H₂O-Cl a 25°C (**Figura 6-3**).

Figura 6-3. Diagrama Eh-pH para el sistema Pd-Pt-H₂O-Cl a 25°C. Modificado de (Talovina & Lazarenkov, 2001)



7. Conclusiones

La roca ultramáfica de Cerro Matoso corresponde a una harzburgita y la de Planeta Rica a una lherzolita, las cuales están compuestas principalmente por olivino, ortopiroxeno y clinopiroxeno. Los minerales accesorios corresponden a cromo-espinela, y serpentina y magnetita como producto de alteración.

El patrón litogeoquímico del perfil CMM-01 de Cerro Matoso y el perfil PR-1136 de Planeta Rica, son característicos de un depósito de silicato de Mg hidratado, el cual sigue la tendencia general de una alta concentración de Fe y Al en la zona limonítica pero una muy baja concentración de Si y Mg en el mismo horizonte. Aunque Cerro Matoso es dominado por este tipo de depósito contiene algunas áreas de tipo óxido como lo indica el perfil CMM-03.

Los mayores contenidos de EGP tanto en Cerro Matoso como en Planeta Rica se concentran hacia el horizonte limonítico, principalmente hacia las zonas de canga y transición laterita-saprolito y son fuertemente agotados desde la parte superior del saprolito verde hasta la peridotita. Este patrón de comportamiento es igual a los perfiles de lateritas tipo óxido en Cuba y silicato hidratado de Mg en República Dominicana.

Las altas concentraciones de EGP hacia los niveles superiores del perfil de meteorización y las correlaciones positivas entre ellos, indican que los EGP son movilizados en diferentes proporciones, siendo más móviles el Pt, Pd y Ru respecto a Os, Ir y Rh, los cuales han sido favorecidos por los procesos de laterización.

Las concentraciones de EGP en Cerro Matoso y Planeta Rica son del orden de ppb, sin embargo éstos deben ser considerados como depósitos no convencionales de estos metales ya que al aplicar métodos de refinación adecuados, éstos metales pueden ser recuperados como subproductos, lo cual favorece la creación de un flujo de caja positivo para la operación minera y la viabilidad de un proyecto futuro.

La alta afinidad entre los EGP y el Fe, favorece la formación de aleaciones minerales de EGP-Fe, tales como el MGP de Pt-Ir-Fe-Ni hospedado en un oxi-hidróxido de Fe, encontrado en el horizonte de transición de laterita a saprolito en uno de los perfiles de Planeta Rica el cual tiene un origen secundario, evidenciado por la morfología irregular y complejación de metales. De manera similar, se infiere una neoformación de los platinoídes formados en los intersticios de piritita secundaria, por el tamaño a nivel de nanopartículas de estos metales y la forma irregular, en donde el Pt puede haber sido transportado en solución bajo condiciones ácidas y alto Eh.

7.1 Impactos del proyecto

Este proyecto de investigación se desarrolló un tema de gran aplicabilidad a la prospección y exploración de EGP en un ambiente no convencional como lo son las lateritas níquelíferas. Los trabajos de investigación en el tema a nivel mundial son pocos, por lo cual este proyecto constituye el primer estudio de este tipo en Colombia y uno de los pocos en el continente americano. Los resultados representan una base de comparación para otras lateritas ultramáficas en el mundo y permite la profundización este tema con el fin de encontrar nuevos objetivos de exploración de EGP en ambientes no convencionales.

En el ámbito socioeconómico, los resultados de este proyecto son de gran impacto en el país dado que los EGP son considerados como minerales estratégicos para la producción y desarrollo de Colombia y estudios de este tipo rompen paradigmas respecto al análisis y definición de nuevas áreas de exploración mineral en depósitos no convencionales.

La creación del semillero de investigación SEMERU como parte del proyecto permitió la vinculación de estudiantes del programa curricular de Ingeniería Geológica a un proyecto de alto impacto para Colombia. Las actividades llevadas a cabo produjeron un impacto académico positivo no solo en los miembros del semillero, sino en la comunidad del Área Curricular de Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia en general, ya que a través de las diversas actividades (ponencias, cursos, salidas de campo, discusión de artículos y participación en la preparación y procesamiento de las muestras tomadas para la investigación objeto del proyecto), los estudiantes del semillero trataron a profundidad temas que no hacen parte integral del plan de estudios, como lo son: ofiolitas y complejos ofiolíticos, yacimientos de EGP, lateritas de Ni-Co, yacimientos ofiolíticos de cromita y lateritas a nivel mundial. Algunas de estas actividades académicas contaron con la participación de investigadores de otras universidades colombianas y de España, lo cual ayudó a fortalecer los lazos de cooperación con estas instituciones.

También, hubo una fuerte colaboración por parte de la empresa South 32 Ltda quienes dieron los accesos a las áreas de estudio y contribuyeron con muestras de perforación vitales para el desarrollo del proyecto. Hubo colaboración por parte de investigadores españoles (Joaquín Proenza, Thomas Aiglsperger, Antonio Casco, Júlia Ferrer, Nuria Pujol, entre otros) que han trabajado fuertemente en el estudio de EGP en lateritas níquelíferas y que contribuyeron con el acceso a laboratorios con equipamiento de muy alta tecnología para el procesamiento de las muestras de este trabajo.

8.Recomendaciones

- 1.** Continuar la línea de investigación en depósitos no convencionales de EGP en lateritas níquelíferas en diferentes ambientes de formación de rocas ultramáficas.
- 2.** Realizar pruebas piloto de concentración de EGP y otros metales como Co y Cu en los materiales de Canga y laterita de Cerro Matoso y Planeta Rica. Aprovechar las zonas de botaderos que se han dispuesto para estos materiales en la Mina de Cerro Matoso.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Minería. (2015a). Niquel. Retrieved October 30, 2016, from <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/niquel.pdf>
- Agencia Nacional de Minería. (2015b). Platino. Retrieved October 30, 2016, from <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/platino.pdf>
- Agencia Nacional de Minería. Resolución Número 135 de 15 Junio de 2017 (2017). Colombia. Retrieved from https://www.anm.gov.co/sites/default/files/resolucion_135_de_2017.pdf
- Aiglsperger, T., Proenza, J. A., Lewis, J. F., Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., ... Durisova, J. (2016). Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni Laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Review*, *73*, 127–147.
- Aiglsperger, T., Proenza, J. A., Zaccarini, F., Labrador, M., & Navarro-Ciurana, D. (2011). Looking for Needles in a Haystack: How to find PGM in laterites by using Hydroseparation Techniques. *Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, *23–24*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/261706759>
- Aiglsperger, T., Proenza, J. A., Zaccarini, F., Lewis, J. F., Garuti, G., Labrador, M., & Longo, F. (2015). Platinum group minerals (PGM) in the Falcondo Ni-laterite deposit, Loma Caribe peridotite (Dominican Republic). *Mineral Deposita*, *50*, 105–123. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0520-9>
- Augé, T., & Legendre, O. (1994). Platinum-group element oxides from the Pirogues ophiolitic mineralization, New Caledonia: origin and significance. *Economic Geology*, *89*, 1454–1468. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.7.1454>
- Bowles, J. F. ., Gize, A. ., Vaughan, D. ., & Norris, S. . (1994). Development of platinum group minerals in laterites-initial comparison of organic and inorganic controls. *Trans. Instn. Min. Metall.*
- Bowles, J. F. ., Gizé, A. P., Vaughan, D. J., & Norris, S. . (1994). Development of platinum-group minerals in laterites - initial comparison of organic and inorganic controls.
- Bowles, J. F. W. (1986). The Development of Platinum-Group Minerals in laterites. *Economic Geology*, *81*(5), 1278–1285. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.5.1278>
- Bowles, J. F. W., Gize, A. P., & Cowden, A. (1994). The mobility of the platinum-group elements in the soils of the Freetown Peninsula, Sierra Leone. *Canadian Mineralogist*, *32*(4), 957–967.
- Brand, N. ., But, C. R. ., & Elias, M. (1998). Nickel Laterites: Clasification and features. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, *17*(4), 81–88.

- Cabral, A. R., Radtke, M., Munnik, F., Lehmann, B., Reinholz, U., Riesemeier, H., ... Kwitko-Ribeiro, R. (2011). Iodine in alluvial platinum-palladium nuggets: Evidence for biogenic precious-metal fixation. *Chemical Geology*, 281, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.003>
- Castro, H. (1987). Minerales de Níquel. In *Recursos Minerales de Colombia* (pp. 327–368). Bogotá: INGEOMINAS.
- Cawthorn, R. G. (2005). Stratiform Platinum-Group Element Deposits in layered intrusions. In J. E. Mungall (Ed.), *Exploration for Platinum-Group Elements Deposits* (Vol. 35, pp. 57–73). Oulu, Finland: Mineralogical Association of Canada Short Course 35.
- Cornwall, H. . (1966). *Nickel deposits of North America. Geological Survey Bulletin 1223*. Washington: Geological Survey Bulletin 1223.
- Dueñas, H., & Duque-Caro, H. (1981). Geología del cuadrángulo F-8, Planeta Rica: Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*, 24, 1–35.
- Duque-Caro, H. (1980). Geotectónica y evolución de la Región Noroccidental Colombiana. *Boletín Geológico Ingeominas*, 23, 4–37.
- Duque, H. (1972). Ciclos tectónicos y sedimentarios del norte de Colombia y sus relaciones con la paleoecología. *Boletín Geológico Ingeominas*, 19(3), 23–68.
- Economou-Eliopoulos, M. (2010). Platinum-group elements(PGE)in various geotectonic settings: Opportunities and risks. *Hellenic Journal of Geosciences*, Vol. 45, 45, 65–82. Retrieved from https://www.google.com.br/_/chrome/newtab?espv=2&ie=UTF-8
- Eliopoulos, D. G., & Economou-Eliopoulos, M. (2000). Geochemical and mineralogical characteristics of Fe-Ni- and bauxitic-laterite deposits of Greece. *Ore Geology Reviews*, 16, 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(00)00003-2)
- European Commission. (2018). *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*. Brussels. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/publications/report-critical-raw-materials-and-circular-economy_en
- Farré De Pablo, J., Aiglsperger, T., Proenza, J. A., Roqué-Rosell, J., González-Jiménez, J. M., & Longo, F. (2017). PGE mobility and PGM neoformation by low-temperature hydrothermal fluids -evidence from uvarovite-bearing chromitites in the Dominican Republic. In *Mineral Resources to Discover-14th SGA Biennial Meeting* (pp. 519–522). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/319269321>
- Forero Castañeda, J. F., Londoño de los Ríos, J. H., Manrique Galvis, J. J., & Rojas Cruz, F. W. (2009). *El Níquel en Colombia*. Bogotá.
- Freyssinet, P., But, C. R. ., Morris, R. ., & Piantone, P. (2005). Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering. *Economic Geology*, 100, 681–722.
- Fuchs, W. A., & Rose, A. W. (1974). The geochemical behavior of platinum and palladium in the weathering cycle in the Stillwater Complex, Montana. *Economic Geology*, 69(3), 332–346. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.3.332>

- Gammons, C. H. (1996). Experimental investigations of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: V. Equilibria between platinum metal, Pt(II), and Pt(IV) chloride complexes at 25 to 300°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(10), 1683–1694. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00048-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00048-8)
- Geotec Ltda. (2003). *Geología de los Cinturones Sinú-San Jacinto. Planchas 50 Puerto Escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta*. Bogotá.
- Gleeson, S. , Butt, C. R. , & Elias, M. (2003). Nickel Laterites: A Review. *SEG Newsletter Society of Economic Geologists*. Retrieved from <http://www.segweb.org>
- Gleeson, S. , Herrington, R. , Durango, J., Velásquez, C. , & Koll, G. (2004). The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. *Economic Geology*, 99, 1197–1213.
- Gómez, J., Monte, N. E., Nivia, Á., & Diederix, H. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1.000.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. Retrieved from www.sgc.gov.co
- González-Jiménez, J. M., Griffin, W. L., Gervilla, F., Proenza, J. A., O'Reilly, S. Y., & Pearson, N. J. (2014). Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part I. A review and new ideas on the origin and significance of platinum-group minerals. *Lithos*. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.06.016>
- González, H., & Londoño, A. C. (2001). *Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Córdoba. Escala 1:250.000*. Bogotá.
- Green, T., & Peck, D. (2005). Platinum Group Elements Exploration: Economic Considerations and Geological Criteria. In J. E. Mungall (Ed.), *Exploration for Platinum-group element deposits* (pp. 247–274). Oulu, Finland: Mineralogical Association of Canada Short Course 35.
- Guzmán, G., Gómez, E., & Serrano, B. E. (2004). *Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano. Escala 1:300.000*. Bogotá.
- Holwell, D. A., & McDonald, I. (2010). A review of the behaviour of platinum group elements within natural magmatic sulfide ore systems. *Platinum Metals Review*, 26–36. <https://doi.org/10.1595/147106709X480913>
- Hoyos, N., & Velázquez, C. A. (1996). *Análisis del Origen de la Lateritización y Saprolitización del Yacimiento Niquelífero de Cerro Matoso*. EAFIT.
- Kiefer, R., & Viljoen, M. J. (2006). PGE exploration targets to the west of the Pilanesberg, South Africa. *South African Journal of Geology*, 459–474. <https://doi.org/10.2113/gssajg.109.4.459>
- Lazarenkov, V. G., Tikhomirov, I. N., Zhidkov, A. Y., & Talovina, I. V. (2005). Platinum Group Metals and Gold in Supergene Nickel Ores of the Moa and Nikaro Deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resources*, 40(6), 600–608.
- Lázaro, C. (2007). *Petrological and Geochemical Study of a Subduction Mélange (Sierra del*

- Convento, Eastern Cuba*). A case of partially melted slab. Universidad de Granada.
- Londoño, A. C., & González, H. (1997). *Geología del Departamento de Córdoba. Mapa Geológico Escala 1:250.000*. Bogotá.
- López-Rendón, J. (1986). *Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso Nickeliferous Laterite, Córdoba, Colombia*. Colorado State University.
- Lusty, P. (2016). Critical metals for high- technology applications: mineral exploration potential in the north of Ireland. In M. . Young (Ed.). Dublin: Unearthed: impacts of the Tellus surveys of north of Ireland. <https://doi.org/10.3318/978-1-908996-88-6.ch8>
- Ministerio de Minas y Energía. Resolución 18 0241 de 24 Febrero 2012 (2012). Colombia. Retrieved from <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=4030017>
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccenna, C., Veloza, G., ... Mesa, A. (2017). Linking Late Cretaceous to Eocene Tectonostratigraphy of the San Jacinto Fold Belt of NW Colombia With Caribbean Plateau Collision and Flat Subduction. *Tectonics*, 36(11), 2599–2629. <https://doi.org/10.1002/2017TC004612>
- Naciones Unidas. (1975). *Evaluación de Lateritas Niquelíferas en los Departamentos de Córdoba y Antioquia*. New York.
- Naldrett, A. J., & Duke, J. M. (1980). Platinum Metals Magmatic Sulfide Ores. *Science*, 208(4451), 1417–1424. <https://doi.org/10.1126/science.208.4451.1417>
- Navarro-Ciurana, D., Aiglsperger, T., & Proenza, J. A. (2012). PGM and Zircon in Al-Rich Chromitite: New Insights by Applying Hydroseparation Technique. *Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*, 186–187.
- Ndjigui, P.-D., & Bilong, P. (2010). Platinum-group elements in the serpentinite lateritic mantles of the Kongo-Nkamouna ultramafic massif (Lomié region, South-East Cameroon). *Journal of Geochemical Exploration*, 107(1), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.06.008>
- O'Driscoll, B., & González-Jiménez, J. M. (2016). Petrogenesis of the Platinum-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. <https://doi.org/10.2138/rmg.2016.81.09>
- Oberthür, T., & Melcher, F. (2005). PGE and PGM in the supergene environment: A case study of persistence and redistribution in the main sulfide zone of the Great Dyke, Zimbabwe. In J. . Mungall (Ed.), *Exploration for Platinum-group element deposits* (pp. 97–111). Oulu, Finland: Mineralogical Association of Canada Short Course 35.
- Ortiz, F., Gaviria, A., Parra, N., Arango, C., & Ramirez, G. (2004). Guías geológicas para la localización de metales preciosos en las ofiolitas del occidente de Colombia. In F. Pereira, E.S, Castroviejo, R., Ortiz (Ed.), *Complejos ofiolíticos en IBEROAMÉRICA. Guías de prospección para metales preciosos*. (pp. 169–199). Madrid: PROYECTO XIII. 1- CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).
- Platina Resources Limited. (2017). *Annual Financial Report por the Year Ended 30 June 2017*. Australia. Retrieved from <https://www.platinaresources.com.au/investors/annual-reports/>

- Plimer, I. R., & Williams, P. A. (1987). New Mechanisms for the Mobilization of the Platinum-Group Elements in the Supergene Zone. In H. . Prichard, P. . Potts, J. F. . Bowles, & S. . Cribb (Eds.), *GEO-PLATINUM 87* (pp. 83–92). London and New York: Elsevier.
- Proenza, J. A. (2015, June). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. *Revista de La Sociedad Española de Mineralogía*.
- Proenza, J., Castroviejo, R., Escayola, M., Cervilla, F., Paladines, A., De Oliveira, D., ... Suita, M. (2004). Principales guías de exploración de metales nobles (elementos del grupo del platino) en complejos ofiolíticos. In F. Pereira, E.S, Castroviejo, R., Ortiz (Ed.), *Complejos Ofiolíticos en IBEROAMÉRICA* (pp. 359–372). Madrid: PROYECTO XIII. 1- CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).
- Ramírez, C., Tobón, M., & Weber, M. (2017). Cartografía, petrografía y geoquímica de las Peridotitas de Planeta Rica y las rocas básicas y sedimentarias asociadas. Santa Marta, Colombia: XVI Congreso Colombiano de Geología.
- Rollinson, H. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. (Longman Scientific & Technical, Ed.). New York.
- Salinas, R., Muñoz, R., Burgath, K.-P., & Tistl, M. (1992). *Mineralizaciones primarias de EGP en el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto, Chocó, Colombia*. Medellín.
- Salpéteur, I., Martel-Jantin, B., & Rakotomanana, D. (1995). Pt and Pd mobility in ferralitic soils of the West Andriamena area (Madagascar). Evidence of a supergene orogin of some Pt and Pd minerals. *Chronique de La Recherche Minière*, 520, 27–45.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1–33. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/140051120/Streckeisen-1976>
- SUMICOL S.A. (2002). *Caracterización Mineralógica de los tipos de roca de la laterita niquelífera de Cerro Matoso S.A., Colombia*.
- Talovina, I. V., & Lazarenkov, V. G. (2001). Distribution and Genesis of Platinum Group Minerals in Nickel Ores of the Sakhara and Elizavet Deposits in the Urals. *Lithology and Mineral Resources*, 36(2), 116–122.
- Terekhov, D. S., & Nanthakumar, V. E. (2013). Direct extraction of nickel and iron from laterite ores using the carbonyl process. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.07.008>
- U.S Geological Survey. (2018). *Mineral Commodity Summaries 2018*. Reston, Virginia. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/70194932>
- UPME. (2018). Producción de Platino en Colombia. Retrieved May 10, 2018, from http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPPL1.aspx
- Villagómez, D. (2010). *Thermochronology, Geochronology and Geochemistry of the Western and Central Cordilleras and Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The Tectonic Evolution of NW South America*. Versoix (Suisse Genève Genève Versoix. Université de Genève. Retrieved from http://www.unige.ch/sciences/terre/mineral/publications/ter_env.html

ANEXO 1

SALIDA DE CAMPO JUNIO DE 2017





XVI CONGRESO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA, 2017
III SIMPOSIO DE EXPLORADORES
"Geología, Sociedad y Territorio"
Santa Marta, Colombia
Agosto 28 – Septiembre 1, 2017

CARTOGRAFÍA, PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS PERIDOTITAS DE PLANETA RICA Y LAS ROCAS BÁSICAS Y SEDIMENTARIAS ASOCIADAS

Ramírez, C.¹, Tobón, M.¹, Weber, M.².

1. Estudiante Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; 2. Docente Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

El municipio de Planeta Rica está ubicado en el sur del Departamento de Córdoba, en el centro de este municipio aflora un cuerpo alargado en dirección N-S de peridotitas y serpentinitas conocidas como "Peridotitas de Planeta Rica", estas peridotitas están asociadas espacial y/o genéticamente con basaltos que aparecen intercalados con rocas sedimentarias de ambiente marino (pertenecientes a la Formación Cansona), andesitas porfídicas y gabros, estas unidades son suprayacidas por rocas sedimentarias continentales pertenecientes a la Formación Ciénaga de oro.

Los trabajos realizados anteriormente en la zona de estudio se han enfocado en el perfil laterítico que se desarrolla sobre la peridotita, debido a su relevancia económica para Níquel. En este trabajo además de estudiar la peridotita de la cual se derivan las lateritas, se estudian las unidades adyacentes al cuerpo ultramáfico, definiendo el carácter de estos contactos. La cartografía fue realizada a escala 1:25000 para todas las unidades; se caracterizaron petrográficamente las diferentes litologías aflorantes muestreadas en afloramiento, además de muestras provenientes de testigos de perforación; se hizo geoquímica de roca total y análisis de microsonda electrónica como parte de la caracterización geoquímica.

En este trabajo se describen dos nuevas unidades; una primera unidad de gabros, que fueron originalmente reportados en la década de 1970, cuando fueron cartografiados como parte de las rocas ultramáficas y los basaltos debido a su estrecha relación con estas dos litologías, en este trabajo se separan estos gabros y se describen las diferentes facies presentes en éstos; la segunda unidad -que no había sido reportada antes- comprende andesitas porfídicas, de carácter hipoabisal que intruyen las rocas de la Formación Cansona.

Al sur del área de estudio entre la cordillera central y la cordillera occidental, al occidente de la falla San Jerónimo afloran unidades litológicamente similares (en general Complejo Quebradagrande y Grupo Cañasgordas) a las descritas en este trabajo, estas unidades aparecen como grandes franjas regionales cuya extensión hacia al norte no es bien conocida, en este trabajo se hace una aproximación a este problema teniendo en cuenta

la tectónica regional, planteando una relación entre las unidades de Planeta Rica con estas unidades más conocidas al sur.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, J., 1983. Geología de la Cordillera Central y el Occidente Colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Meso-Cenozoicos. Boletín Geológico, Volumen 26, pp. 1-175.

Álvarez, J., 1984. Serpentinitas y epidota anfibolitas de Ituango, Departamento de Antioquia, Colombia, Medellín: Ingeominas.

Dueñas, H. & Duque, H., 1981. GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO F-8. Boletín Geológico, 24(1), pp. 1-35.

Estrada, J. J., Viana, R. & González, H., 2001. Geología de la plancha 205 (Chinchiná), Bogotá: INGEOMINAS.

Gervilla, F. y otros, 2012. Formation of ferrian chromite in podiform chromitites from the Golyamo Kamenyane serpentinite, Eastern Rhodopes, SE Bulgaria: a two-stage process. Contrib Mineral Petrol.

Gleeson, S. y otros, 2004. The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit. Economic Geology, pp. 1197-1213.

Gonçalves, C., Domingos, J. & Pacheco, W., 1999. Chemical and mineralogical analyses of a weathering mantle developing on peridotite of the mining area for nickel in Cerro Matoso, Colombia. Hyperfine Interactions, pp. 171-176.

González, H., 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín geológico, XXIII(1), pp. 1-174.

González, H., 2006. Mapa geológico del departamento de Antioquia, s.l.: INGEOMINAS.

González, H. & Londoño, A. C., 2001. Mapa geológico del departamento de Córdoba, Bogotá: INGEOMINAS.

Grosse, E., 1926. Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte Occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el Río Arma y Sacajoal, Berlín: Departamento de Antioquia.

Hall, R., Álvarez, J. & Rico, H., 1972. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas. Boletín Geológico, XX(1), pp. 1-82.

Hernández, Y., Almanza, O. & Cogollo, R., 2006. Caracterización de muestras arcillosas provenientes de la mina de níquel de Cerro Matoso (Córdoba - Colombia). Revista colombiana de Física.

Lopez-Rendón, J., 1986. Geology, mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso nickeliferous laterite, Cordoba, Colombia. Fort Collins: Colorado state university.

Mejía, V. & Durango, J., 1981. Geología de las lateritas níquelíferas de Cerro Matoso. Boletín de Geología, pp. 117-123.

Montoya, D. & Peláez, I., 1993. Ultramafitas y rocas relacionadas de Heliconia, Medellín: s.n.

Naciones Unidas, 1975. Investigación detallada de los depósitos de lateritas níquelíferas de Planeta Rica (Departamento de Córdoba), Nueva York: s.n.

Naciones Unidas, 1976. Investigación detallada de los cuerpos ultrabásicos del área de Uré (Departamento de Córdoba), Nueva York: NACIONES UNIDAS.

Restrepo, J. J. & Toussaint, J. F., 1988. Terranes and Continental Accretion in the Colombian Andes. EPISODES, XI(3).

Schmid, R. y otros, 2007. How to name a metamorphic rock, s.l.: s.n.

Siivola, J. & Schmid, R., 2007. List of mineral abbreviations, s.l.: s.n.

Toussaint, J. F. & Restrepo, J. J., 1974. Algunas consideraciones sobre la evolución de los Andes Colombianos. Publicaciones especiales de geología, Issue 4.

CURSO DE METALOGENIA DE OFIOLITAS - 2017

ORGANIZA:	 SEMERU <small>SEMILLERO ESTUDIANTIL EN METALOGENIA DE ROCAS ULTRAMÁFICAS UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN</small>	APOYA:	 FACULTAD DE MINAS	
------------------	--	---------------	---	---

CURSO DE METALOGENIA DE OFIOLITAS




TEMARIO: -Depósitos ofiolíticos de cromita
-Depósitos lateríticos de Ni-Co
-"Metales críticos" (EGP, Sc y REE) en depósitos lateríticos de Ni-Co

DICTADO POR:

Joaquín A. Proenza, PhD
Profesor titular del Departamento de Mineralogía, Petrología y Geología Aplicada de la Universidad de Barcelona

Thomas H. Aiglsperger, PhD
Investigador posdoctoral en el Departamento de Mineralogía, Petrología y Geología Aplicada de la Universidad de Barcelona

INVERSIÓN:	FECHA:	LUGAR:	CONTACTO:
\$40.000*	26 y 27 de mayo	Facultad de Minas	agallardoes@unal.edu.co

*Incluye refrigerios, certificado y libreta

RESERVA ÚNICAMENTE CON EL PAGO, CUPOS LIMITADOS



CHARLA MAGISTRAL – 2016

CINTURÓN PLEGADO DE SAN JACINTO

CONTEXTO GEOTECTÓNICO DE CUERPOS ULTRAMÁFICOS

Jorge Ariel García Torres
Geólogo – Consultor



CHARLA MAGISTRAL – 2017

ORGANIZA:



CONFERENCIA

The 3.5 Ga São Tomé layered mafic-ultramafic intrusion, NE Brazil: Insights into a Paleoproterozoic Fe-Ti-V oxide mineralization and its reworking during West Gondwana assembly



Conferencista:

Ingeniero Geólogo, Msc.
Felipe Velásquez

FECHA: Martes 12 de Septiembre
HORA: 2:00 PM
LUGAR: Facultad de Minas
Salón M1-220