

## **Caracterización geológica de las lateritas en diferentes regiones metalogénicas: comparación de los yacimientos San Felipe y Piloto**

Rosa M. Cobas-Botey

### **Resumen**

Se realizó un estudio comparativo con el objetivo de revelar las características geoestructurales y geomorfológicas así como las regularidades espacio-temporales del origen y evolución de dos regiones metalogénicas exógenas de Cuba, emplazadas en cortezas de meteorización originadas sobre ofiolitas. Las diferencias en la evolución morfoestructural entre ambas regiones han condicionado el desarrollo espacio-temporal diferenciado de las cortezas de intemperismo niquelíferas en ambos territorios. En el bloque morfoestructural de Oriente septentrional los movimientos recientes de la corteza terrestre están caracterizados por fuertes levantamientos que comenzaron en el Plioceno y continúan en nuestros días; en el bloque morfoestructural de Camagüey central estos han sido mucho más débiles, dando lugar a una mayor estabilidad de la región y, por tanto, al desarrollo de un relieve mucho más maduro y antiguo que en Oriente septentrional. En este último la transferencia de agua fue generalmente intensa o media, mientras que en Camagüey fue lenta, marcando otra importante diferencia en cuanto a la presencia de sílice libre en el perfil de las cortezas. Los yacimientos San Felipe, en Camagüey y Piloto, en Oriente, son ejemplos típicos de diferencias evolutivas.

**Palabras clave:** Perfil de intemperismo; yacimiento San Felipe; yacimiento Piloto; corteza laterítica.

## **Geological characterization of the laterite ore from different metallogenic regions: Comparison between San Felipe and Piloto ore bodies**

### **Abstract**

This investigation deals with a comparative analysis for the identification of the geo-structural and geomorphological characteristics in addition to the spatial-temporal regularities of the origin and evolution of these two exogenous metallogenic regions of Cuba, located on the weathering crust that occurred on ophiolites. The differences in the morphostructural evolution contributed to the differentiated spatial-temporal development of nickel weathering crusts in both territories. In the morphostructural block of the northern west, the recent earth crust movements are characterized by strong uplifts that started in the Pliocene and continue to date. These uplifts have been weaker in the morphostructural block of central Camaguey, resulting in an increased stability of the region and therefore in the development of a more mature and older relief compared to that of the northern west. In the latter, water transfer was generally intense with regard to the free silica contained in the crust profile. The San Felipe (Camaguey) and Piloto (Moa) ore bodies are representative examples of evolutionary differences.

**Keywords:** weathering profile; San Felipe ore body; Piloto ore body; laterite crust.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En Cuba se desarrollan cortezas ferro-cobalto-niquelíferas en diferentes regiones. Este estudio se refiere a las cortezas lateríticas de Moa y Camagüey, representadas por los yacimientos Piloto y San Felipe, respectivamente. Los estudios realizados recientemente en San Felipe han demostrado que sus características geoquímicas, mineralógicas y geológicas resultan ser únicas, lo cual lo hace diferente a las cortezas desarrolladas en la región nororiental; estas diferencias no habían sido reportadas anteriormente, pues los estudios alcanzados en la región central eran insuficientes para esta comparación.

Formell (2002) compara las ofiolitas desarrolladas en las regiones de Oriente y Camagüey. El presente artículo contrasta específicamente dos yacimientos de estas regiones: Piloto, desarrollado en la región oriental y San Felipe, en la región central de Cuba. La comparación está fundamentada en los principales agentes que participan en la formación y desarrollo de las cortezas de intemperismo como son: la geología, el relieve, la geoquímica, la mineralogía y movimiento de las aguas. Los estudios más detallados de estos yacimientos, tomados como base para esta investigación, se encuentran en los archivos de la ONRM, como trabajos de prospección y exploración geológica, no presentados anteriormente como trabajos investigativos. En general, estos yacimientos habían sido poco estudiados.

Los yacimientos de corteza de meteorización constituyen una formación geológica continental independiente, generada bajo la acción de los agentes atmosféricos líquidos, gaseosos y biógenos sobre las rocas primarias, a raíz de lo cual surgen en su lugar nuevas rocas con una textura, una estructura, una composición mineral y química propias, que contienen yacimientos de minerales (Smirnov 1982).

A pesar de que los yacimientos San Felipe y Piloto se desarrollan en ambientes geológicos similares, macizo ofiolítico representado por peridotitas serpentinizadas, serpentinitas y harzburgitas entre otros y sobre superficies de nivelación, esas superficies se encuentran a diferentes niveles hipsométricos, lo que determina diferencias fundamentales en las condiciones de la transferencia de las aguas y, consecuentemente, en los tipos y potencias de los perfiles de la corteza de intemperismo resultantes.

Mientras que en la región metalogénica de la parte oriental de Cuba las cortezas se caracterizan por perfiles abreviados (Formell 1979, 2002) o incompletos (Smirnov 1982) de la formación menífera goethito ferro-cobalto-niquelífera y potencias moderadas (a excepción de las áreas con

ocurrencia de dislocaciones disyuntivas o relieves ondulados con presencia frecuente de contrapendientes). En Camagüey, por el contrario, las cortezas presentan perfiles completos, a veces complejos, de la formación menífera nontronito-niquelífera con grandes potencias de sus perfiles que oscilan entre 3 m y 36 m, con un promedio de 20 m. El promedio de la envolvente mineral es de aproximadamente 10 m, con una cubierta o escombro promedio de alrededor de 8 m (varía de 0 m a 15 m); las menas niquelíferas están asociadas a arcillas esmectíticas, las cuales se distribuyen de forma regular y continua por todo el depósito, sin embargo, en el yacimiento Piloto no existe casi presencia de ellas en el perfil o no han sido reportadas.

En los perfiles de las cortezas desarrolladas en la región oriental prácticamente no hay presencia de sílice libre (Cobas, Campos & Cadete 1997; Cobas 2013), mientras que en Camagüey los perfiles se caracterizan por abundante sílice libre en forma de ópalos, calcedonias y marshalita presentes en prácticamente todos los horizontes de la corteza de intemperismo comprobado durante las perforaciones de alrededor de mil pozos documentados y muestreados en los trabajos de prospección desarrollados en San Felipe (Formell *et al.* 1998; Formell 1999, 2002).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el presente estudio se utilizaron los datos de las prospecciones y exploraciones del yacimiento Piloto (Rodríguez *et al.* 1985; Cobas, Campos & Cadete 1997; Cobas 2013). Los del yacimiento San Felipe son datos generados entre los años 1998 al 2000 (Formell *et al.* 1998; Formell 1999, 2002) a partir de las perforaciones que tuvieron lugar en diferentes etapas con distintas redes de perforación (500x200 m, 200x200 m, 100x100 m, 50x50 m, hasta 25x25 m) y en el área noroeste (1000x1000 m) para determinar el espesor real de las cortezas en esta área y sus potencias, que no habían sido mapeadas con anterioridad.

En total se perforaron 14 821,65 m lo que aportó un volumen de muestras de 14 267, a las cuales se les determinó el contenido de Fe, Ni, Co, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Además, se utilizaron para confirmar el carácter esmectítico nontronítico de las menas que controlan la mineralización en San Felipe los estudios de Gallardo *et al.* (2010, 2011) sobre la mineralogía de este yacimiento bajo el análisis de los métodos de difracción de rayos X (DRX), tanto de muestras en polvo como de agregados orientados (AO, AO+EG, AO+550°C) y microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) y de transmisión (TEM-AEM).

Se utilizó también la información de las investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) sobre la base de análisis petromineralógicos, granulométricos y de fases, lo cual nos permitió profundizar en el conocimiento de las características mineralógicas y la distribución granulométrica de los principales minerales portadores de Ni en los diferentes sectores del yacimiento (Cabrera 2005).

Para el yacimiento Piloto se usaron datos de 407 pozos perforados en redes de 300x300 m y 100x100 m, para un total de 4 643 muestras con resultados de Fe, Ni, Co, SiO<sub>2</sub> Mg, Al, Cu, Cr, Mn y Zn, todos en forma de metal, a excepción de la sílice, así como los estudios mineralógicos realizados en estas exploraciones, etc.

Se revisó toda la documentación geológica en soporte magnético y en copia dura en los archivos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales y para el procesamiento de la información se utilizaron las herramientas del Microsoft Office (Excel, Access) y el Surfer para la elaboración de los mapas.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A pesar de que los yacimientos cubanos San Felipe y Piloto se desarrollan sobre un macizo ofiolítico, representado fundamentalmente por el complejo peridotítico, constituido por peridotitas serpentinizadas (harzburgitas, lherzolitas, wherlitas), dunitas y piroxenitas y por un complejo cumulativo compuesto por diques de gabros, microgabros y diabasas, existe una diferencia marcada entre ambos yacimientos. Tales diferencias tienen su explicación en las condiciones geomorfológicas confirmadas durante la investigación y los recorridos de campo realizados, las cuales quedan constatadas en los resultados de las determinaciones de la composición química y mineralógica de estos yacimientos.

Las condiciones de la transferencia de las aguas también difieren, asociadas fundamentalmente a las condiciones del relieve; mientras que fue muy lenta en San Felipe, dando lugar a un perfil con una inusual participación de la sílice, tanto libre como combinada, resultado de la muy difícil extracción del sistema de las aguas altamente mineralizadas, en Piloto una extracción sistemática de las aguas mineralizadas hace que se desarrollen perfiles clásicos de la corteza, casi sin ninguna participación de la sílice.

En Piloto la corteza de intemperismo es más oxidada que en San Felipe. La comparación de la composición química de San Felipe y Piloto muestra un comportamiento inverso entre los contenidos de hierro (Fe) y de la sílice (SiO<sub>2</sub>) debido a que la precipitación de sílice en San Felipe fue mucho mayor que en Piloto (Figura 1).

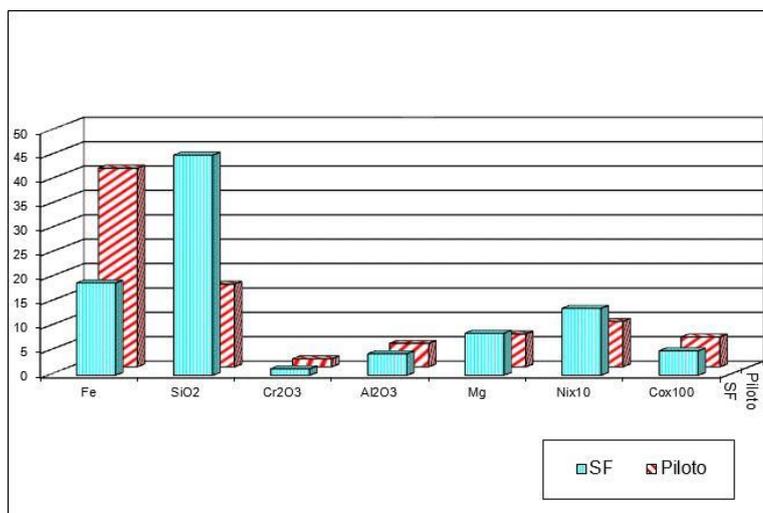


Figura 1. Comparación de la composición química (en %) de los yacimientos San Felipe (SF) y Piloto.

Los contenidos de Ni, por su parte, son un tanto superiores en San Felipe que en Piloto a causa de una mayor participación de las menas silicatadas ricas en Ni en San Felipe. El contenido de cobalto es inferior en San Felipe por su típica asociación con el Fe, el cual posee valores bajos, no típico en los depósitos lateríticos cubanos (Figura 2). El magnesio es más alto por estar la mineralización en San Felipe asociada a menas menos oxidadas que en Piloto; por lo que, aplicando la clasificación empleada por Brant, Butt y Elias (1998), el yacimiento Piloto se ubica en el tipo C y San Felipe en el tipo B.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la composición química por horizontes en San Felipe. En el eje inferior los diferentes horizontes del perfil de intemperismo para este yacimiento, según la clasificación definida y empleada durante los estudios geológicos así como la que se registra en las Bases de Datos de las perforaciones y otros trabajos realizados en la Oficina Nacional de Recursos Minerales (Formell *et al.* 1998; Formell 1999, 2002).

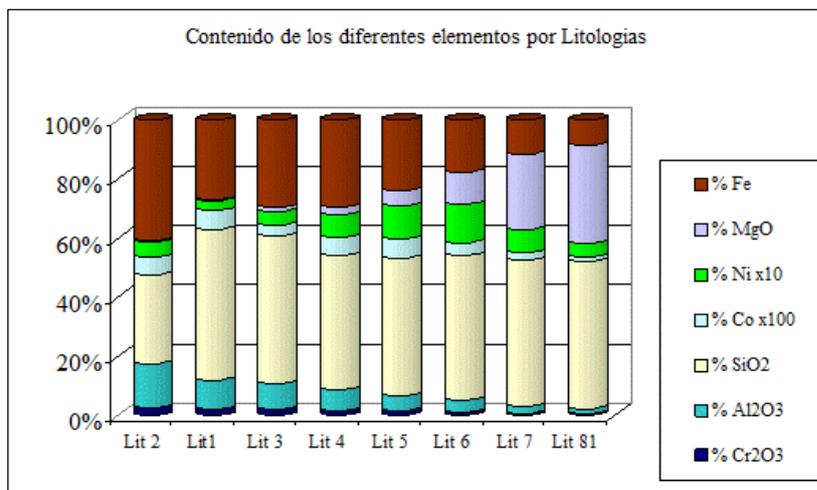


Figura 2. Composición química por litologías, yacimiento San Felipe.

Tabla 1. Códigos y descripción de los horizontes del perfil de intemperismo utilizados para San Felipe

Código	Horizonte del corte de intemperismo
Lit 1	Coraza de de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
Lit 2	Limonita con pisolitos y coraza de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
Lit 3	Limonita no textural sin pisolitos
Lit 4	Limonita textural (Zona de transicional)
Lit 5	Ocre no textural nontronítico (limonita >serpentina)
Lit 6	Serpentina nontronitizada (nontronita > serpentina )
Lit 7	Serpentina lixiviada
Lit 8	Roca madre (peridotita)
Lit 81	Harzburgitas serpentinizadas

El perfil de la corteza en Piloto es clásico, mostrando un aumento paulatino del Fe de los horizontes inferiores a los superiores, mientras que los contenidos de sílice van disminuyendo también de forma gradual (Figura 3). Esta figura describe en el eje horizontal los diferentes horizontes del perfil de intemperismo, según la clasificación utilizada durante los últimos estudios realizados (Cobas, Campos & Cadete 1997; Cobas 2013). Los códigos empleados se detallan en la Tabla 2.

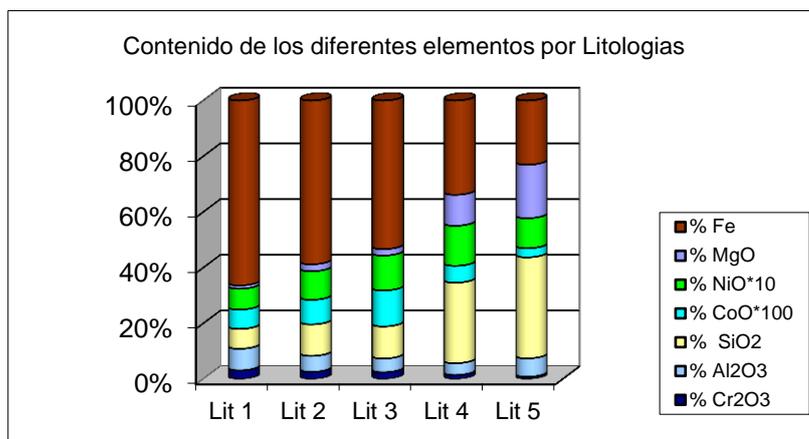


Figura 3. Composición química por litologías, yacimiento Piloto.

Tabla 2. Códigos y descripción de los horizontes del perfil de intemperismo utilizados para Piloto

Código	Horizonte del corte de intemperismo
Lit 1	Ocres inestructurales con perdigones
Lit 2	Ocres inestructurales
Lit 3	Ocres estructurales finales
Lit 4	Ocres estructurales iniciales
Lit 5	Serpentina lixiviada

En San Felipe, por el contrario, la sílice se distribuye de manera relativamente uniforme a todo lo largo del perfil, causando una distribución errática del resto de los elementos. La sílice en el perfil de San Felipe se distribuye no solo en los silicatos sino también de forma libre como ópalos, calcedonias y aún como marshalitas.

El yacimiento San Felipe lo clasificamos, según los tres tipos de yacimientos lateríticos niquelíferos definidos en el tipo B, depósitos silicatados arcillosos; denominados así por la presencia de esmectitas (nontronita, nepouita, saponita, etc.) ricas en Ni, con contenidos de Ni que oscilan desde 0,83 % hasta 1,05 %, como promedio 0,93 % de Ni. Los depósitos de este tipo representan aproximadamente del 5 al 10 % de los recursos niquelíferos globales (Brant, Butt & Elias 1998).

El yacimiento Piloto lo clasificamos en el tipo C: depósitos oxidados, por la presencia de los oxihidróxidos de Fe con Ni en goethita (Brant, Butt & Elias 1998). Los contenidos de Ni en la zona mineral van desde 1,13 hasta 1,29 %, como promedio 1,16 %.

Las superficies de Piloto y San Felipe, a pesar de que ambas son generalmente de tipo meseta, presentan diferencias en la distribución de las pendientes. Mientras que en San Felipe la superficie es principalmente

aplanada, con una ligera caída hacia el NW, dando un aspecto de cuesta, en Piloto, por el contrario, se desarrollan frecuentes escarpas y contra pendientes en el microrrelieve de la superficie que determinan diferencias en el régimen de la transferencia de las aguas y, consecuentemente, el desarrollo de varios tipos de perfiles de la corteza (Figuras 4 y 5).

Mientras, en San Felipe, situada en las primeras centenas de m.s.n. (56,7-199,0 con una media de 119,4 m), el régimen de la transferencia de aguas es muy lento, resultando perfiles de la corteza completos y con abundante presencia de sílice libre que no pudo ser extraída del sistema de drenaje. En Piloto, situado a cotas por encima de los 800 m.s.n. (822,3-904,1 con una media de 866,9 m), coexisten regímenes de transferencia de las aguas muy intensos, intensos y de intensidad media que resultan en perfiles de la corteza incompletos, abreviados y completos, en dependencia de las condiciones del microrrelieve.

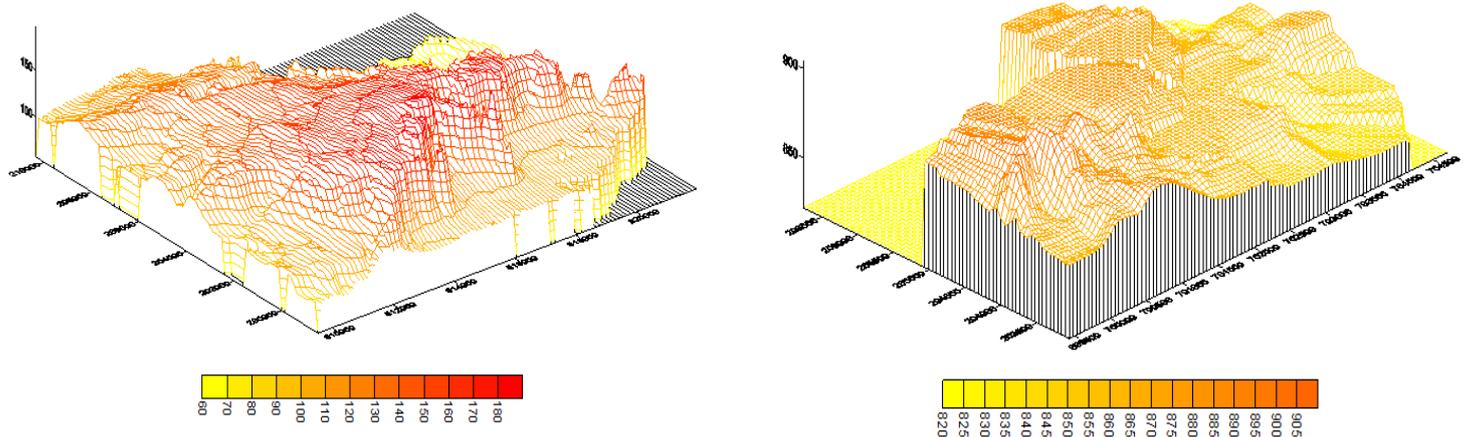


Figura 4. Relieve de los yacimientos San Felipe (izq.) y Piloto (der.).

Este relieve, en general de tipo meseta, provoca la presencia de pendientes similares pero distribuidas de diferentes formas dentro del yacimiento. En San Felipe las pendientes elevadas bordean la meseta, con una caída hacia al noroeste, dándole aspecto más bien de cuesta (Formell 1999); en Piloto las pendientes más elevadas se distribuyen irregularmente por toda el área, lo que destaca las características del relieve que provocan, en definitiva, las diferencias entre ellos.

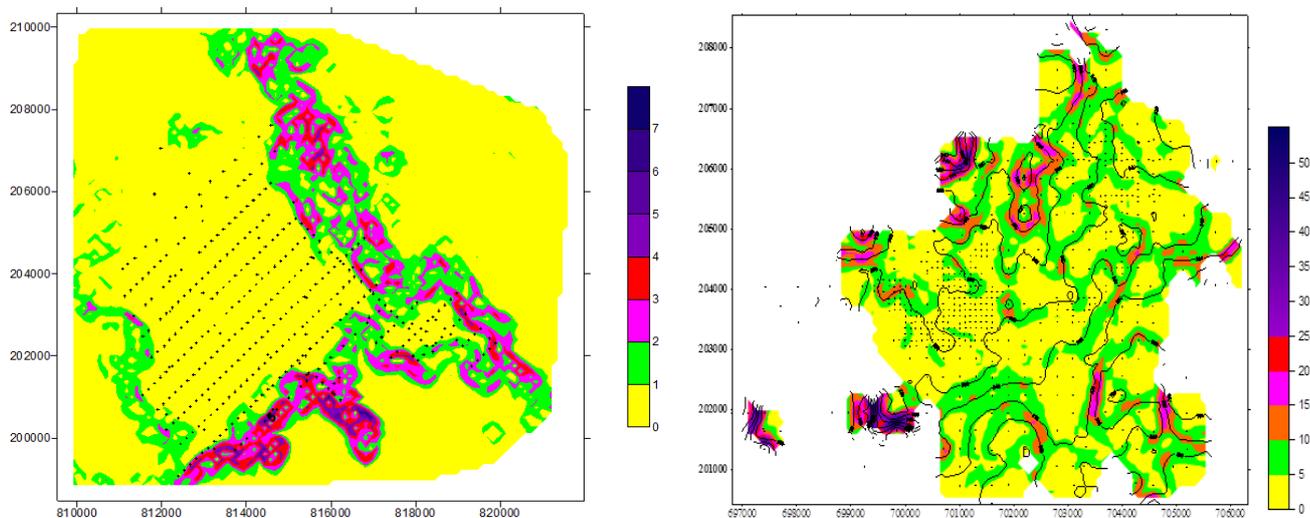


Figura 5. Mapas de pendiente de los yacimientos San Felipe (izq.) y Piloto (der.).

La meseta de San Felipe es parte de una corteza de intemperismo residual y se extiende por, aproximadamente, 70 km<sup>2</sup>; con potencias que oscilan entre 3 m y 36 m, con un promedio de 20 m. Los mayores espesores de la corteza se desarrollan en los bordes SE y E, en una franja de alrededor de un kilómetro que bordea gran parte de la meseta. Las menas níquelíferas están asociadas a arcillas esmectíticas (nontronita, nepouita, saponita, etc.), las cuales se distribuyen de forma regular y continua por todo el depósito y su potencia promedio es de 10 m, con una cubierta o escombro promedio de 8 m (varía desde 0 a 15 m).

Las mayores potencias están asociadas a las crestas que se alinean a lo largo de los bordes abruptos de la meseta San Felipe (SE, NE-NW) por las condiciones de drenaje favorables que se presentan en esa franja. La orientación general de la misma es de dirección NW-SE, coincidiendo con la denominada dirección cubana, paralela a la dirección estructural de la falla Cubitas.

La corteza de intemperismo se profundiza aprovechando las tendencias de las diferentes direcciones estructurales, que forman estructuras en V, favoreciendo la circulación de las aguas y facilitando la evacuación de magnesio y sílice, a la vez que se enriquecen en níquel y cobalto. La mineralización está asociada fundamentalmente a los ocreos texturales saprolíticos.

El yacimiento Piloto, de igual forma, es parte de una corteza de intemperismo residual que constituye un peniplano en forma de meseta que cubre un área aproximada de 75 km<sup>2</sup>, el cual posee, dentro de su área, pequeños cerros del sistema El Toldo-La Calinga, drenado por los ríos Jaragua y Piloto; en estos, a su vez, desembocan un gran número de

pequeños arroyos y corrientes intermitentes. Los manantiales surgentes fundamentalmente en épocas de lluvias son muy abundantes.

Se observan zonas con características diferentes en la corteza de intemperismo; en el área central las potencias superan los 15 m, mientras que en los alrededores de esta los valores son menores de 15 m. Existen, además, áreas donde la corteza prácticamente no se desarrolla. Aparecen representadas todas las litologías o zonas de la corteza y se nota un apreciable predominio de los ocres texturales limoníticos y los saprolíticos; estos últimos casi duplican los primeros. La mineralización está asociada fundamentalmente a los ocres texturales.

#### **4. CONCLUSIONES**

- Se observan diferencias notables entre los yacimientos San Felipe, en Camagüey, y Piloto en la región de Moa, las cuales están determinadas por las condiciones geomorfológicas, por el origen y evolución de sus cortezas de intemperismo, por las características de los minerales portadores de mena y por el grado de conservación de la corteza oceánica, la cual está mejor conservada en las ofiolitas de San Felipe que en las del yacimiento Piloto.
- La diferencia fundamental y más notoria, que además hace de San Felipe único de su tipo en Cuba, está dada en su mineralogía, que atendiendo a la clasificación que realizan Brant, Butt y Elias (1998), el yacimiento San Felipe es de tipo B: depósitos silicatados arcillosos con presencia de esmectitas (nontronita, nepouita, saponita) ricas en Ni y el yacimiento Piloto es tipo C: depósitos oxidados con la presencia de los oxihidróxidos de Fe con Ni en goethita.
- Las condiciones de muy lenta transferencia de las aguas en San Felipe ha provocado la complejidad en el perfil de la corteza de intemperismo con la participación inusual de la sílice, tanto libre como combinada, resultado de la muy difícil extracción del sistema de las aguas altamente mineralizadas. En Piloto la extracción sistemática de las aguas mineralizadas hace que se desarrollen perfiles clásicos de la corteza, casi sin ninguna participación de la sílice en el perfil.

#### **5. REFERENCIAS**

- BRANT, N. W; BUTT, C. R. M. & ELIAS, M. 1998: Nickel Laterites: Classifications and features. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics* 17(4): 81-88.
- CABRERA, I. 2005: Evaluación de los minerales portadores de níquel en ultrabasitas del peniplano Camagüey y comparación con depósitos del

- macizo Moa Baracoa. En: I Congreso de Minería. II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas níquelíferas. Memorias.
- COBAS, R. M. 2013: Modelo geológico descriptivo del yacimiento Piloto. Región Moa, Holguín, Cuba. En: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra.
- COBAS, R. M.; CAMPOS, D. C. L. & CADETE, M. 1997: Informe geológico comprobatorio del mineral en el yacimiento Piloto. Características del mineral laterítico del yacimiento Piloto y su posibilidad de procesamiento en Moa Nickel S.A. Inv. 4720. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- FORMELL, C. F. 1979: Clasificación morfogenética de las cortezas de intemperismo níquelíferas sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. *Ciencias de la Tierra y del Espacio* 1: 33-49.
- FORMELL, C. F. 1999: Informe III Comité de Administración San Felipe Mining. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- FORMELL, F. 2003: Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente Septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo níquelíferas. En: Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano, TGMNI 02. V Congreso Cubano de Geología y Minería. Ciudad de La Habana, marzo, p. 24-28.
- FORMELL, C. F.; COBAS, B. R. M.; RAVELO, R. L.; BARYOLO, L. & GONZÁLEZ, V. 1998: Programa de perforación orientativa. Primera fase proyecto San Felipe. San Felipe Mining. Inv. 5208. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- GALLARDO, T.; CHANG, A.; TAULER, E. & PROENZA, J. A. 2010: El yacimiento San Felipe (Camagüey, Cuba): un ejemplo de lateritas níquelíferas tipo arcilla. *Macla* 13(septiembre): 87-88.
- GALLARDO, T.; TAULER, E.; GARCÍA-ROMERO, E.; PROENZA, J. A.; SUAREZ-BARRIOS, M. & CHANG, A. 2011: Caracterización mineralógica de las esmectitas níquelíferas del yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba). *Macla* 15(septiembre): 89-90.
- RODRÍGUEZ, O.; RODRÍGUEZ, R. H.; BASULTO, G.; ALMAGUER, F. A.; SAUNDERS, E. & PÉREZ, A. R. 1985: Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda detallada y evaluativa realizados en los sectores La Delta, Cupey, Canta Rana, Santa Teresita y Piloto con cálculo de reservas 1-1-85. Inv. 3375. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- SMIRNOV, V. I. 1982: *Geología de yacimientos minerales*. Mir, Moscú. 654 p.