

Migración geoquímica en la corteza de meteorización del macizo ofiolítico de Camagüey, Cuba

Alfonso-Chang-Rodríguez ^(*1) y Waldo-Lavaut-Copa ⁽²⁾.

(1) *Empresa Geomínera Camagüey, Camagüey, Cuba. E mail: achangr@ismm.edu.cu*

(2) *Dirección de Prospección, Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Cuba. Email: waldo@igp.minem.cu*

Recibido: junio 2016	Aceptado: junio 2017
----------------------	----------------------

Resumen

En la actualidad existen lagunas en el conocimiento del comportamiento de los elementos químicos durante la migración provocada por la meteorización. El objetivo del presente trabajo es establecer los mecanismos de la migración geoquímica de los componentes en el yacimiento San Felipe. Se presta especial atención a la migración del níquel como componente útil de la corteza. Para el análisis químico de 38 000 muestras provenientes de 1 700 pozos ordinarios de perforación se empleó la técnica de plasma acoplado inductivamente (ICP). En el comportamiento de los elementos químicos en las cortezas de meteorización influyen además de los factores conocidos, las condiciones de acidez, alcalinidad y de reducción oxidación. El olivino, los piroxenos y las serpentinas son la fuente primaria de la migración geoquímica de los metales en el yacimiento, caracterizado por la formación de perfiles arcillosos silicatados. La corteza de meteorización se clasifica como ácida-oxigenada y sus materiales son ferrosialíticos. Las barreras geoquímicas principales son el pH, Eh y la adsorción.

Palabras claves: Geoquímica, corteza meteorización, migración, macizo ofiolítico, San Felipe, Cuba.

Geochemical migration on the weathering crust of the Camaguey ophiolitic massif, Cuba

Abstract

There are omissions in the knowledge of the chemical elements behavior, in spite of some works done in this field. The principal objective of this article is to establish the geochemical migration mechanisms of elements on San Felipe deposit. Special attention to nickel like useful component. For the chemical analysis of 38 000 samples from 1 700 drill holes was used Inductive Couple Plasma (ICP). The behavior of chemical components in the weathering crusts is determined by its chemical properties, mineralogical composition and acid-alkaline and reduction-oxidation conditions. Olivine, pyroxenes and serpentines are the primary sources of the metals for the geochemical migration in the deposit, which is characterized by the formation of silicate clayed profiles. The weathering crust is classified as acid-oxygenate and its materials are ferrosialitic. The main geochemical barriers are pH, Eh and adsorption.

Key words: Geochemistry, weathering crust, migration, ophiolitic massif, San Felipe, Cuba.

¹ Alfonso Chang Rodríguez. Especialista Geología. EGMC. Cuba. alfonsochr@geocmg.minem.cu

1. Introducción

El comportamiento de los elementos químicos en las cortezas de meteorización se determina por tres factores: sus propiedades químicas, el tipo de paisaje y la composición mineralógica de las rocas. Está regido por las condiciones de acidez-alcalinidad y redox.

Perelman (1972) determinó las series de las intensidades de extracción de los elementos químicos de las cortezas de meteorización atendiendo a las magnitudes de los coeficientes de migración acuosa.

Como tendencia general, en el transcurso de la formación de las cortezas de meteorización se pone de manifiesto la extracción de los elementos más móviles y el consiguiente enriquecimiento relativo en ellas de los elementos menos móviles, particularmente Al, Fe y Ti.

Muñoz Gómez, et al., (2007) plantean que la migración geoquímica del níquel está condicionada por el carácter químico del metal en diferentes condiciones geotectónicas, a saber, magmáticas, condiciones hidrotermales y las vinculadas con las condiciones exógenas, en las cortezas de intemperismo de las ultramafitas serpentinizadas. Además, la química del metal está controlada por el comportamiento geoquímico de los elementos de la familia del hierro: Fe, Cr, Co, Mn, Ti, V, entre otros.

Guinzburg (1946) divide el corte en cuatro zonas geoquímicas: 1. de hidrólisis final, 2. de hidrólisis parcial y lixiviación final, 3. de hidratación e hidrólisis inicial y 4. de hidratación inicial y lixiviación de la roca madre por grietas.

Los aspectos químicos y mineralógicos de estos depósitos están íntimamente relacionados con el tipo de roca madre (Lavaut Copa, 1987). Sobre el control litológico y mineralógico de la mineralización de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en la región de Moa, este autor declara la influencia del tipo de roca subyacente en la formación de un determinado perfil de alteración intempérica, estableciendo determinadas asociaciones de minerales para cada perfil.

Para realizar una caracterización de los tipos de perfiles de meteorización del yacimiento San Felipe es necesario explicar la clasificación de tipos litológicos de perfiles aplicada actualmente en Cuba (Lavaut Copa, 1998). Este autor agrupa los perfiles primeramente en tres grandes familias y luego se subdividen en ocho dominios. Las clasificaciones por criterios geoquímicos y mineralógicos conducen a una agrupación que no coincide con los límites de la zonalidad litológica natural visualmente observable en el terreno. Esta tiene que ser determinada, no visualmente, sino con investigaciones analíticas complejas realizadas a escala de laboratorio (Lavaut Copa, 2004).

La migración geoquímica en los perfiles lateríticos consiste en la traslación de los elementos químicos, resultando en su redistribución y cambios en sus formas de existencia, asociados a la ocurrencia de procesos exógenos. Consta de las etapas de dispersión y de concentración.

Las barreras geoquímicas representan sectores de la corteza terrestre donde ocurre una disminución notable de la capacidad de migración de uno o varios elementos químicos.

Proenza Fernández (2015) realiza una investigación sobre la geoquímica del níquel y otros elementos en yacimientos lateríticos. Plantea que las principales menas de níquel en los yacimientos tipo arcilla son las saponitas y esmectitas donde el elemento principal se encuentra sustituyendo al Mg y o al Fe en la capa octaédrica, con concentraciones de hasta un 4%. Bucher et al (2015) plantean que las paragénesis de los elementos químicos y su zonalidad geoquímica se expresan mediante la aparición secuencial de la asociación de minerales formados en las mismas condiciones desde la roca madre, hasta las zonas superiores del perfil de alteración.

Entre los años 1998 y 2004 se realizaron los trabajos de prospección para níquel por parte de la Asociación Económica Internacional Geominera S.A & San Felipe Mining Ltd., que consistieron en la perforación de pozos en las redes de 1000x1000m y 500x200m. En los sectores más perspectivas se densificó en redes de 200x200m y pasando a exploración 100x100m. Además se excavaron 5 pozos criollos y un tajo minero que permitieron realizar investigaciones tecnológicas para la caracterización metalúrgica de las menas.

Los trabajos más recientes pertenecen a Chang Rodríguez et al (2013, 2015 b y 2016 b). Este autor realiza una caracterización geoquímica del yacimiento.

Constituye el problema científico de esta investigación las insuficiencias en el conocimiento sobre la migración geoquímica en los perfiles de meteorización del yacimiento San Felipe, que permita una definición del esquema tecnológico de procesamiento.

Además, en las fases establecidas como portadoras de Ni y Co, se desconoce si estos elementos están como iones adsorbidos en la superficie cristalina o como iones substituyendo en la estructura mineral. Estas limitaciones están dadas, en parte, por las particularidades de las fases minerales que componen a las saprolitas, las cuales mayoritariamente tienen granos de muy pequeño tamaño, son amorfas o de muy pobre cristalinidad.

Trabajos relacionados con la migración geoquímica en la corteza de intemperismo como la del yacimiento San Felipe, son escasos y caen en el campo de las investigaciones especializadas; no obstante constituye una de las tareas

que se hace necesario realizar, pues sus resultados pueden ser aplicados en varios campos desde el minado hasta la obtención de un producto tecnológico más rico en Ni, sin excluir el análisis de su comportamiento en los procesos geológicos.

El objetivo fundamental del presente trabajo es establecer los mecanismos de la migración geoquímica de los componentes en el yacimiento San Felipe. Se presta especial atención a la migración del níquel como componente útil de la corteza.

2. Materiales y métodos

2.1 Características generales y definición de la zona de estudio

El complejo ofiolítico de Camagüey está situado en la región centro-oriental del cinturón ofiolítico de Mariel-Holguín y presenta una morfología en forma de arco de, aproximadamente, 120 km de longitud y anchura máxima de 40 km (promedio 10 km). Está formado por dos estructuras antiformes, en las cuales se reconoce una secuencia ofiolítica casi completa. Toda la estructura del complejo ofiolítico cabalga sobre los sedimentos mesozoicos de la plataforma norteamericana. La unidad de peridotitas está constituida, principalmente, por harzburgitas con cantidades menores de websteritas, lherzolitas y cuerpos dispersos de dunitas. Las harzburgitas muestran un tamaño de grano medio y están compuestas por olivino y ortopiroxenos (enstatita, 8-10 % en volumen) alterados, en su mayoría, a serpentina. Las dunitas pueden contener pequeñas cantidades de plagioclasa, sin alcanzar nunca el 10 % en volumen, y espinela cromífera accesoria.

El complejo ofiolítico Camagüey muestra un corte completo, pero en el sector seleccionado del yacimiento San Felipe solo aparecen representadas las peridotitas con texturas de tectonitas, con un predominio de rocas harzburgíticas. La región donde se ubica el área de la meseta San Felipe ocupa la parte central de la isla y está formada por una gama variada de litologías de diversos tipos de rocas con diferentes edades, que van desde el Neógeno-Cuaternario, Paleógeno hasta el Cretácico. En el caso particular los depósitos Neógeno-Cuaternario (N2-Q), eluvio-deluvio-lateríticos, donde se encuentra San Felipe, están bordeados por la asociación ofiolítica (Fig. 1).

Las lateritas niquelíferas de San Felipe están desarrolladas sobre rocas ultramáficas de la asociación ofiolítica (harzburgitas con un variado grado de serpentinitización).

La condición media imprescindible para el desarrollo del perfil actual es la existencia de la asociación ofiolítica. Otros factores favorables son la afectación tectónica del material de roca madre por el sobrecorrimiento, la presencia de un clima marcadamente tropical, con altas temperaturas y precipitaciones periódicas y una morfología ondulada, inclinada desde el sur-sudeste hacia el norte-noroeste con elevaciones entre 137-199 m sobre el nivel del mar. Las laderas abruptas de la meseta son el resultado de la erosión, particularmente a lo largo de los bordes más elevados NE y SE. El terreno alrededor es relativamente llano con una elevación media de 100 m sobre el nivel de mar.

Las deformaciones estructurales y el fallamiento son intensos. Las estructuras más pronunciadas son las fallas de sobreempuje de tendencia WNW-ESE. Las fallas principales están expresadas en la morfología como depresiones topográficas lineales. La compresión continua dio lugar a diversas fallas de segundo orden y juntas en varias direcciones.

El relieve está formado por un conjunto de alturas residuales dentro de las cuales la mayor es la altiplanicie de San Felipe, la cota máxima es de 199 m al E. El resto de las alturas son de menor dimensión y están estrechamente vinculadas por su génesis y morfología. Su superficie, en general, es plana y en ella se desarrolla una potente corteza de intemperismo de tipo saprolítico de un espesor aproximado de 25 a 40 m.

La temperatura promedio oscila entre 23 y 26 °C. Las precipitaciones durante el año oscilan entre 1 000 mm y 400 mm.

La meseta presenta un relieve ligeramente ondulado con algunas colinas que alcanzan cotas algo superiores a 195 m en su porción oriental. El área que ella ocupa supera los 60 km². La red hidrográfica interna está poco desarrollada sobre todo en la parte sudeste de la meseta. Hacia el noroeste, donde las cotas son menores, existen algunos arroyos intermitentes y hacia la parte central se encuentran zonas bajas y pantanosas. El nivel de las aguas subterráneas se determina entre 1 y 6 m dentro de la meseta y de 3 a 9 m de profundidad fuera de ella.

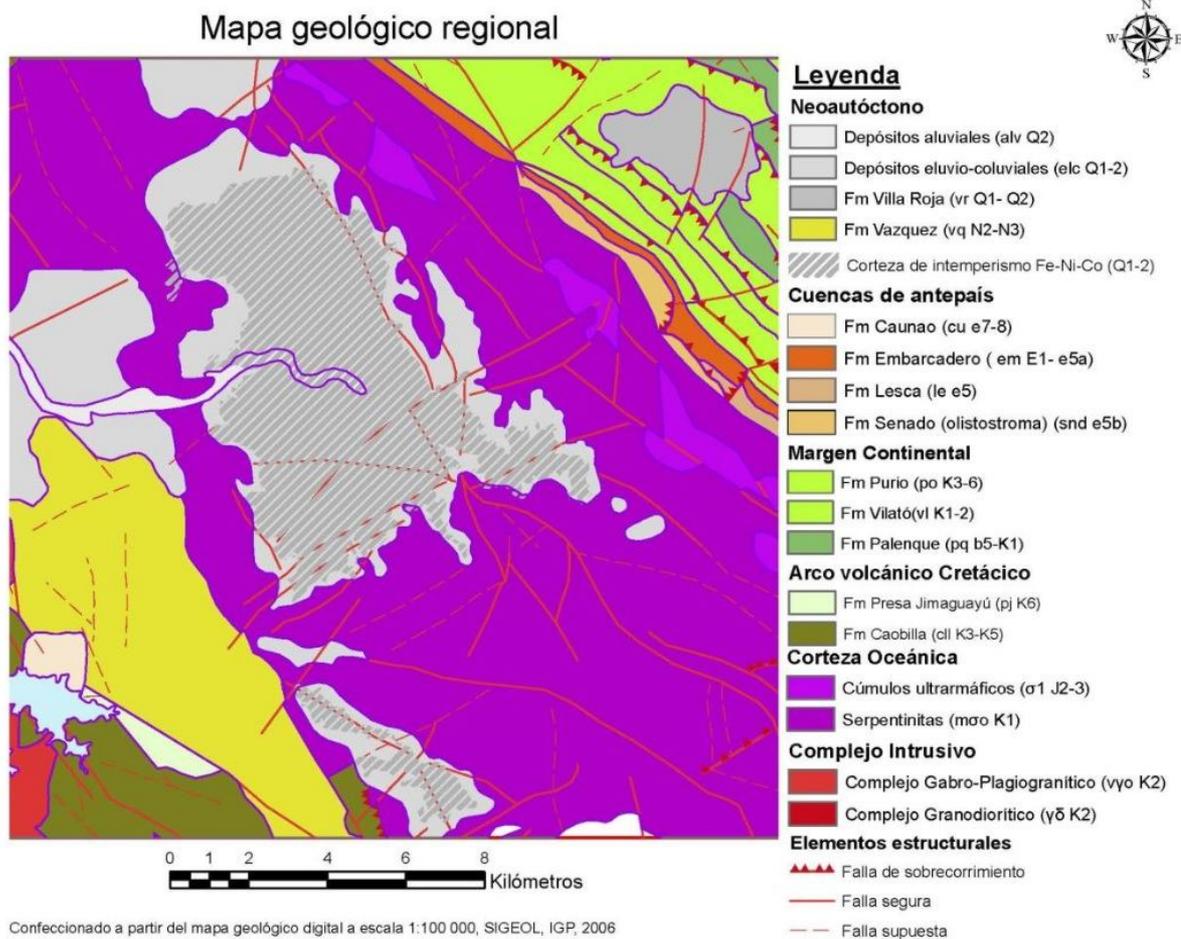


Fig. 1 Plano geológico regional y del yacimiento San Felipe con su leyenda. Tomado de Arias y Cobas (2016), inédito.

Los principales procesos del intemperismo químico y sus efectos en las rocas ultramáficas se muestran en la tabla I.

Tabla I. Efectos en las rocas de los procesos generales de la meteorización

Procesos generales	Efectos en las rocas ultramáficas
1. Lixiviación de los constituyentes móviles: álcalis, alcalinotérreos	Descomposición del olivino, piroxeno, serpentina y lixiviación del Mg, Ni, Mn, Co.
2. Formación de minerales estables secundarios: óxidos de Fe y Al, arcillas	Formación de goethita, nontronita, adsorción del Ni desde soluciones.
3. Lixiviación parcial de componentes menos móviles: sílice, alúmina, Ti	Lixiviación de sílice en climas húmedos.
4. Movilización y reprecipitación parcial de constituyentes controlados por reacciones de redox: Fe, Mn	Precipitación de óxidos de Mn y adsorción de Ni y Co desde soluciones.
5. Retención y concentración residual de minerales resistentes: zircón, cromita, cuarzo	Concentración residual de cromita.

Los resultados de Zimmerman (1984) permitieron establecer en la meseta San Felipe una corteza de meteorización perspectiva para níquel (Fig. 2). Para este estudio se seleccionaron 1700 sondeos pertenecientes a todo el yacimiento.

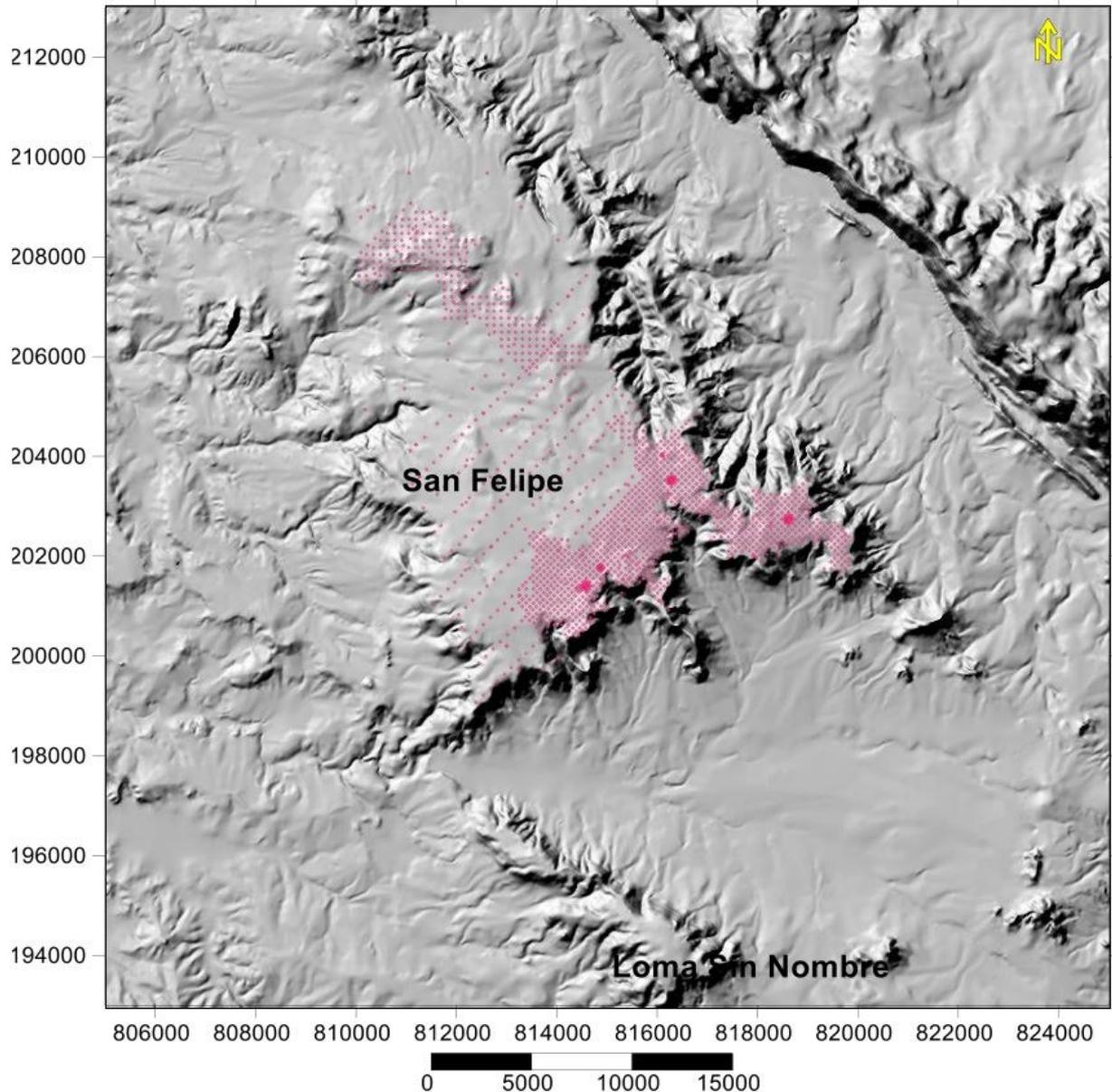


Fig. 2. Plano de datos reales con la ubicación de los sondeos muestreados (puntos en rojo) del yacimiento San Felipe

2.2 Muestreo y caracterización de los perfiles

Las muestras estudiadas provienen de 1700 sondeos del perfil laterítico-saprolítico de San Felipe.

En total se dispone de 38 000 muestras de pozos de perforación. En la fig. 3 se ilustra la columna litológica esquemática de yacimiento San Felipe (Chang, 2016a).

La terminología utilizada en este trabajo (Formell et al., 1998, 1999) con sus equivalentes en el ámbito internacional, fundamentalmente anglo-francés, es:

Zona Laterítica (Limonites, pedolito):

- Coraza ferruginosa (hardpan, duricrust). 1 520 muestras.
- Ocre no texturales con perdigones (nodular and ferricrete zone). 6 081 muestras.
- Ocre no texturales sin perdigones (laterite rouge, mottle zone). 2 987 muestras.
- Ocre texturales lateríticos (ferruginous saprolite, saprolite fine). 1 499 muestras.

Zona Saprolítica (Saprolites):

Aquí se encuentran los ocre texturales nontroníticos y las serpentinitas nontronitizadas, sub-zonas donde se concentra la mineralización níquelífera. Presenta una coloración abigarrada (gris, verde de varios tonos, negrozco-pardo, violeta, blancuzco). El material es limoso, arenoso hasta arcilloso. En esta zona se encuentran además, en contacto con las rocas madres del basamento, una sub-zona de serpentinitas lixiviadas.

- Ocre texturales nontroníticos (clayous saprolite). 14 711 muestras.
- Serpentinitas nontronitizadas (earthy saprolite). 6 473 muestras.
- Serpentinitas lixiviadas (rocky saprolites). 3 125 muestras.

Zona del Basamento (parent rocks, bedrock):

- Peridotitas serpentinizadas descompuestas (unaltered peridotites). 1 604 muestras.



Fig. 3. Columna litológica esquemática de yacimiento San Felipe

2.3 Técnicas analíticas

Las muestras de los testigos de perforación fueron preparadas en la muestrería de la Empresa Geominera Camagüey. Consistió en el secado a 105 °C hasta una masa constante por 24 horas. Se anotó el peso resultante y se reportó el contenido de humedad.

Las muestras secas se molieron y pulverizaron obteniendo fracciones menores de 150 μm de 250 g cada una.

Para el análisis químico de las 38 000 muestras provenientes de 1 700 pozos ordinarios de perforación se empleó la técnica analítica de plasma acoplado inductivamente (ICP) ubicado en el laboratorio acreditado "Elio Trincado" de la Empresa Geominera Oriente. Se realizaron determinaciones de Ni, Fe, Co, MnO, TiO₂, MgO, SiO₂, Al₂O₃ y Cr₂O₃.

Las muestras fueron secadas nuevamente a temperatura constante (105 °C). Una porción de 0.2 g se fundió con NaCO₃ y tetraborato de Na y disuelto en agua regia (HCl-HNO₃).

Los datos de análisis químico fueron tratados estadísticamente para establecer la correlación entre los principales elementos.

3. Resultados y discusión

3.1 Composición química

El yacimiento San Felipe se diferencia notablemente de los depósitos de lateritas ferroniquelíferas del resto del país. Por otra parte tiene características similares a otros depósitos del mundo, localizados en regiones de clima tropicales y subtropicales, como en Australia y Brasil (Golightly, 2010).

Las características químicas de las zonas de la corteza de intemperismo del yacimiento San Felipe (ver tabla II) muestran un cuadro en correspondencia con la génesis de estos depósitos exógenos, evidenciando una zonalidad química vertical muy bien definida.

Tabla II. Composición química del perfil de meteorización del yacimiento San Felipe. Resultados de los análisis por ICP (en %). Valores del mínimo, máximo y desviación estándar de cada compuesto.

Zona	Contenidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	NiO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	CoO
Coraza ferruginosa	Min	5,9	3,7	12,3	0,09	0,05	0,1	0,9	0,03	0,01
	Max	89,2	24,8	67,4	0,84	2,91	0,9	4,8	0,9	0,09
	Desv. est.	19,6	12,5	9,4	0,49	2,53	0,3	0,6	0,7	0,1
Ocres no texturales con perdigones	Min	7,7	4,1	16,5	0,1	0,09	0,2	0,6	0,02	0,02
	Max	84,7	21,9	69,7	0,89	2,18	1,0	4,1	0,6	0,1
	Desv. est.	15,4	8,6	9,3	0,53	1,97	0,3	0,5	0,8	0,2
Ocres no texturales sin perdigones	Min	10,9	5,2	11,5	0,2	0,1	0,1	0,5	0,02	0,02
	Max	81,3	19,4	63,9	0,99	3,1	1,0	3,8	0,5	0,3
	Desv. est.	13,7	4,1	7,9	0,71	2,9	0,4	0,7	0,6	0,4
Ocres texturales lateríticos	Min	11,9	2,9	9,1	0,4	0,5	0,4	0,4	0,02	0,03
	Max	80,0	17,3	58,6	2,4	3,8	1,2	3,2	0,4	0,8
	Desv. est.	12,3	4,8	7,1	1,9	3,5	0,4	0,6	0,6	0,7
Ocres texturales nontroníticos	Min	25,9	1,7	8,7	0,3	2,1	0,5	0,3	0,02	0,04
	Max	78,6	9,8	40,4	2,1	8,9	2,8	2,9	0,3	0,7
	Desv. est.	10,9	2,6	5,1	1,6	4,5	0,9	0,4	0,5	0,6
Serpentinitas nontronitizadas	Min	21,9	1,2	7,9	0,2	2,9	0,6	0,2	0,02	0,02
	Max	69,7	9,3	37,2	1,7	23,4	3,1	2,3	0,1	0,2
	Desv. est.	8,5	2,7	4,9	1,1	8,5	1,3	0,5	0,4	0,3
Serpentinitas lixiviadas	Min	23,8	0,7	5,8	0,2	8,4	0,3	0,2	0,01	0,02
	Max	61,5	6,5	27,4	1,3	33,9	0,9	1,8	0,08	0,09
	Desv. est.	5,9	2,3	4,1	0,8	9,1	0,5	0,6	0,3	0,2
Serpentinitas descompuestas	Min	31,7	0,5	4,9	0,1	23,4	0,1	0,1	0,01	0,01
	Max	46,2	3,4	18,0	0,9	39,5	0,8	0,9	0,04	0,05
	Desv. est.	4,3	1,6	3,6	0,7	3,7	0,2	0,5	0,1	0,2

Tabla III. Valores de los contenidos promedios de los elementos químicos (en %) de todas las zonas.

Zona	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	NiO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	CoO
Coraza ferruginosa	20,30	12,90	51,80	0,39	0,20	0,39	1,90	0,08	0,03
Ocres no texturales con perdigones	23,90	11,70	52,50	0,46	0,50	0,50	1,70	0,07	0,04
Ocres no texturales sin perdigones	34,70	10,40	48,30	0,74	0,90	0,60	1,50	0,06	0,05
Ocres texturales lateríticos	40,80	8,30	40,40	0,92	1,40	1,00	1,20	0,05	0,09
Ocres texturales nontroníticos	49,00	4,60	29,10	0,83	4,50	1,45	1,00	0,04	0,08
Serpentinitas nontronizadas	48,00	3,30	19,60	0,50	15,00	1,58	0,80	0,03	0,04
Serpentinitas lixiviadas	45,00	2,00	12,10	0,37	27,40	0,75	0,50	0,02	0,03
Serpentinitas descompuestas	43,00	1,40	8,90	0,21	32,80	0,36	0,40	0,01	0,02

En las zonas inferiores de rocas poco meteorizadas se presentan altos contenidos de sílice y magnesio (tabla III), representado por los minerales serpentiniticos, olivinos y cloritas, los cuales tienden a disminuir hacia las zonas superiores, donde en condiciones oxidantes y de un pH más ácido se concentran los minerales de hierro, aluminio y cromo.

Las zonas lateríticas son fundamentalmente ferrosas, con alrededor de 50 % de Fe₂O₃, 10 a 13 % de Al₂O₃, mayor de 1,5 % de Cr₂O₃ y con un contenido de NiO de 0,39 a 0,60 %, donde la tendencia del aluminio, al igual que la del cromo, es de concentrarse en las zonas superiores, en la coraza ferruginosa.

Los minerales de Mg y Si (arcillas esmectíticas) desempeñan un importante papel en las saprolitas, e influyen de cierta forma en la distribución y grado de retención del níquel en estos materiales. En esta zona los contenidos de SiO₂ sobrepasan el 40 % en peso, mientras que el MgO tiene alrededor de 8 % en peso como promedio.

3.2 Comportamiento y migración de los elementos químicos durante el desarrollo de la corteza de meteorización

Los yacimientos de corteza de intemperismo se forman en un ambiente físico-químico que propicia, a partir de determinadas condiciones geológicas, la formación del material laterítico-saprolítico donde tiene lugar la concentración residual de algunos metales como el Fe, Al, y Cr entre otros, y la lixiviación del Mg y la sílice principalmente (Golightly, 2010; Wilson, 2004).

En los productos residuales ocurre una significativa concentración de casi todos los elementos minoritarios presentes en las rocas madres independientemente de la capacidad de migración acuosa de los mismos en las condiciones hipergénicas (Lavaut Copa, 2015).

El níquel pasa a la serpentina del olivino y el piroxeno. Se libera en los estadios tempranos de la descomposición de la serpentina, pasando a la solución acuosa. Aquí el níquel está en forma de bicarbonato, en menor medida en forma de sulfato y con menor frecuencia como Ni(OH)₂. En tal estado es evacuado de la parte superior de la corteza a la profundidad volviendo a precipitarse en forma de minerales níquelíferos secundarios. Así el níquel se separa del hierro, dada la difícil oxidabilidad de este y su deposición para valores bajos de pH. También se separa del manganeso y cobalto que se oxidan después del hierro, pero antes que el níquel.

La corteza de intemperismo San Felipe conforma un sistema termodinámico con la movilización y redistribución de los componentes químicos caracterizado por la acción de los procesos oxidantes en lo fundamental, sobre una base ultrabásica, ya que aparecen en menor medida rocas básicas. Hacia las partes superiores del corte predomina una composición ferruginosa aluminica, mientras que hacia la base la composición de las rocas es silicática magnésica. Al mismo tiempo ocurre la alteración de las particularidades texturo-estructurales producto de la transformación secuencial del material. Podemos considerar como extremos de los procesos de transformación a las rocas madres del sustrato y a la zona de coraza ferruginosa, la cual constituye el resultado final que responde a las condiciones de superficie. Las demás zonas por su esencia en el sistema, son intermedias y se encuentran en equilibrio con el medio circundante.

Como resultado del proceso de migración de algunos elementos como el Mg y la Si y la concentración residual de los menos móviles: Ti, Fe, Al, Cr, Mn y Co en el estadio final del perfil de alteración, queda expresado uno de los rasgos principales de las cortezas de intemperismo: su zonalidad geoquímica vertical, acorde con sus características mineralógicas. Esta zonalidad vertical permite prever la tendencia de variación de determinados elementos a través del perfil de intemperismo.

La migración geoquímica manifiesta dos estadios básicos: a) acumulación general inicial de elementos metálicos (Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Co, V, Cu, Zn, Zr, Mn, Nb, Ga, Au, Pt, Pd) con lixiviación y acarreo de los álcalis (Na, K, Ca, Mg) y silicio; b) redistribución parcial vertical de elementos metálicos (Fe³⁺, Cr³⁺, Mn, Co, Ni, Au, Pt, Pd) según las barreras geoquímicas (sorcionales, cambios de pH).

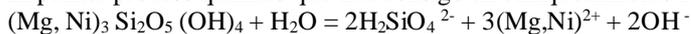
En el ambiente de meteorización de la corteza San Felipe existen cuatro parámetros que controlan la movilidad de las especies químicas: estabilidad mineral (contraste entre las condiciones de formación de la roca madre y las que prevalecen en ambiente superficial); potencial iónico (expresa el grado de hidratación de cada especie química); disponibilidad de protones en el sistema (pH) y disponibilidad de electrones en el sistema (Eh).

El níquel en su existencia es un metal divalente Ni²⁺ con un radio iónico de 0,68 Å, similar en longitud microscópica al magnesio divalente Mg²⁺ con radio iónico de 0,69 Å. Por tal razón la existencia de ambos metales se sustituyen mutuamente en las rocas del manto superior, lo que caracteriza su existencia en las condiciones que existen en la parte inferior de la corteza (Muñoz Gómez et al., 2007).

La forma primaria de existencia del níquel en las ultrabasitas de Camaguey es en forma de olivino – (Mg,Fe)₂SiO₄. Se puede afirmar que a partir de este mineral portador comienza la migración del níquel en la corteza de intemperismo San Felipe, mediante el complejo proceso de lateritización.

La acción de los agentes de la meteorización sobre las litologías ultramáficas va produciendo la destrucción de los minerales primarios, en particular los minerales ferro magnesianos, olivino y piroxenos. Las transformaciones que se llevan a cabo en la corteza de meteorización se realizan a través de reacciones químicas: oxidación, hidratación, hidrólisis y diálisis. Se desarrollan casi simultáneamente en el proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas.

El primer proceso químico que trae consigo un enriquecimiento relativo de Ni es la lixiviación de la serpentina.



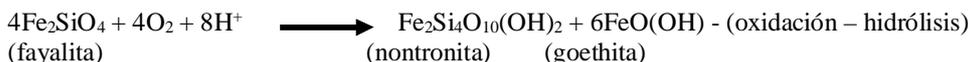
Ahora el Ni²⁺ con y el Mg²⁺ con un mismo radio iónico, se encuentran disueltos aunque debe considerarse que el Ni todavía se queda en su mayor parte durante el proceso de la lixiviación dentro de la misma serpentina, en la cual puede enriquecerse hasta 2.0%. El níquel se precipita en ambiente con pH=6.6-7.0, por lo cual se explica la habilidad de la migración limitada del níquel a partir de esta zona en solución. Su transporte se realiza en forma de bicarbonato Ni (HCO₃)₂ ↔ Ni²⁺ + 2HCO₃⁻. La mayoría del níquel de las serpentinas lixiviadas se quedan enriquecidas de modo residual a la roca respectiva, mientras pocas cantidades se encuentran en las nontronitas y migrando en aguas subterráneas.



En la reacción anterior la liberación del Ni²⁺ en la solución acuosa proveniente de la transformación del olivino y piroxenos rómbicos y liberado de la estructura de la goethita de la zona laterítica sustituye al Mg²⁺ en la estructura de la serpentina lizardita formándose la serpentina niquelífera. Obsérvese que el Mg²⁺ que está en solución acuosa es removido de la corteza en forma de solución que migra a zonas inferiores o pasa a formar parte de la magnesita la que, en ocasiones, rellena grietas en zonas profundas de las ultramafitas.

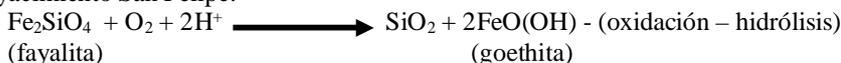
La ocurrencia de los silicatos de níquel en la zona de saprolitas, se fundamenta en la sustitución del Mg²⁺ por Ni²⁺, formándose esmectitas niquelíferas, cloritas niquelíferas y los minerales del grupo de la serpentina portadores del metal. La liberación del níquel en forma catiónica desde la goethitas, origina un proceso de enriquecimiento, que se observa por los altos contenidos del metal en esta zona del perfil.

Continuando el proceso de la descomposición, encontramos en la saprolita la mayor parte de nontronita, la más importante portadora de Ni en la altiplanicie San Felipe (Chang Rodríguez et al 2015a, 2015b). El níquel debe estar incorporado a la red atómica de estos materiales, en cantidades más altas que en la serpentina. Disminuciones de contenido de Ni que ocurren a veces en las saprolitas, han sido originados parcialmente por las intercalaciones de serpentinita lixiviada.



De la reacción anterior se demuestra la transformación más común que se desarrolla en el proceso de lateritización de la corteza San Felipe, que es la formación de nontronita y la adsorción desde la solución del Ni²⁺ que queda libre. Este proceso caracteriza la zona saprolítica en las menas del yacimiento de SF,

La otra transformación del olivino, muestra la formación de cuarzo y goethita, proceso que también tuvo lugar en el yacimiento San Felipe:



El proceso de adsorción del Ni^{2+} por la goethita también tiene lugar en la transformación del olivino al formar sílice libre (ópalo, calcedonia) y goethita.

Olivino \longrightarrow (proceso de intemperismo – lateritización): liberación de cationes Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} ; lixiviación del Si y la formación de fases amorfas, ópalo y calcedonia.

Por primera vez se establece un modelo de la migración geoquímica del níquel en el yacimiento saprolítico San Felipe, caracterizado por la formación de perfiles arcillosos silicatados.

3.3 Influencia del pH y Eh en los perfiles de alteración

Para el caso específico de la corteza de meteorización San Felipe (Chang Rodríguez 2016b), desarrollada a partir de rocas ultrabásicas, se puede comprobar que $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ precipitan hacia la parte superior del perfil, donde el pH es más bajo. A mayor profundidad y en condiciones de pH más elevado precipitan $\text{Mn}(\text{OH})_3$ y $\text{Co}(\text{OH})_3$. En zonas aún más profundas de la corteza precipitan $\text{Ni}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y $\text{Co}(\text{OH})_2$, cuando el pH alcanza valores comprendidos entre 5.3 y 6.8. Por último, en las zonas más profundas, en condiciones neutras o ligeramente alcalinas ($\text{pH} \geq 7$) se separa el grueso del níquel en forma de silicatos arcillosos.

Como se ha mostrado, la solubilidad del hierro, la sílice y la alúmina depende del pH de la solución. El Fe^{3+} , cuyos compuestos sólo se disuelven en soluciones muy ácidas ($\text{pH} < 3$) prácticamente no puede migrar durante la formación de la corteza de meteorización. Algo semejante sucede con la alúmina, fácilmente soluble en condiciones muy ácidas y muy alcalinas, pero prácticamente insoluble para valores del pH comprendidos entre 4 y 9, propios de la corteza.

Por su parte, la solubilidad de la sílice es mínima para condiciones de pH comprendidas entre 2 y 4, aumentando significativamente en las condiciones neutras y alcalinas. La variación de la solubilidad del Fe_2O_3 , Al_2O_3 y SiO_2 en función de la variación del pH del medio permiten explicar las relaciones mutuas entre estos componentes en las cortezas de meteorización y sus diferentes zonas.

Como el silicio y el aluminio presentan en las condiciones naturales imperantes en la corteza terrestre y en su superficie un solo estado de oxidación (Al^{3+} y Si^{4+}), las condiciones redox no ejercen influencia alguna en su comportamiento, contrariamente a como sucede con el hierro, cuyo estado de oxidación varía en dependencia de dichas condiciones (Fe^{2+} y Fe^{3+}). Por esta razón, el comportamiento del hierro estará regido tanto por las condiciones de acidez-alcalinidad como redox.

Clasificación geoquímica de la corteza de intemperismo y barreras asociadas

Los cationes presentes en las soluciones de la corteza de meteorización no son suficientes para neutralizar los productos ácidos. Esto da lugar a que las aguas adquieran carácter ácido y que la descomposición de los minerales transcurra en un medio ácido, lo que determina la extracción de la mayoría de los cationes. En esta corteza ácida se forman caolinita, halloysita y otros minerales arcillosos.

En las zonas inferiores de la corteza, como resultado del aumento del pH y el surgimiento de barreras alcalinas, se concentran algunos elementos que migran en las soluciones ácidas desde los suelos y las zonas superiores. Los medios neutrales y hasta los alcalinos están condicionados tanto por los cationes acarreados desde las zonas más superficiales como por aquellos producidos durante la descomposición de los minerales primarios de las zonas inferiores.

Según Chang Rodríguez, 2016b, el magnesio se extrae de las capas superiores de la corteza, de las zonas de óxido-hidróxidos (ocres) y nontronitas, al tiempo que en las capas inferiores, donde predomina el medio básico (en las serpentinitas lixiviadas y en la zona de fragmentación) este elemento se sedimenta en forma de magnesita. Como consecuencia del magnesio extraído de la parte superior, en las zonas inferiores surgen barreras alcalinas en las que se concentran toda una serie de elementos, entre ellos Ni, Co, Cu, Zn y Pb.

En las cavidades tiene lugar la sorción de los metales por parte de las arcillas, es decir, se combinan las barreras alcalinas y de sorción. En semejantes condiciones se formó el yacimiento hipergénico de níquel San Felipe.

Atendiendo a las condiciones de acidez-alcalinidad y oxidante-reductora de las aguas podemos clasificar la corteza de intemperismo desarrollada sobre el macizo Ofiolítico de Camagüey dentro de la clase geoquímica Ácidas y Oxigenadas.

Algunos de los rasgos que permitieron esta clasificación fueron la ausencia de sales fácilmente solubles y CaCO_3 , empobrecimiento de cationes de muchos elementos con elevada capacidad de migración y concentración de los mismos en las barreras alcalinas y de sorción que surgen en las zonas inferiores.

En base a sus contenidos de óxido de hierro (III), sílice y alúmina, los materiales en los perfiles de meteorización son ferrosialíticos.

Las barreras geoquímicas que inciden directamente son pH, Eh y adsorción.

Conclusiones

Por primera vez se establece un modelo de la migración geoquímica del níquel en el yacimiento saprolítico San Felipe, caracterizado por la formación de perfiles arcillosos silicatados.

Queda mostrado que el incremento del níquel hacia la zona de las saprolitas está condicionado además, por la migración del mismo desde los horizontes superiores, produciendo un enriquecimiento supergénico.

Como resultado del proceso de migración de algunos elementos como el Mg y la Si y la concentración residual de los menos móviles: Fe, Al, Cr, Mn y Co en el estadio final del perfil de alteración, queda expresado uno de los rasgos principales de las cortezas de intemperismo: su zonalidad geoquímica vertical, acorde con sus características mineralógicas.

En el ambiente de meteorización de la corteza San Felipe existen cuatro parámetros que controlan la movilidad de las especies químicas: estabilidad mineral; potencial iónico; disponibilidad de protones en el sistema (pH) y disponibilidad de electrones en el sistema (Eh).

La corteza de intemperismo desarrollada sobre el macizo Ofiolítico de Camagüey se clasifica dentro de la clase geoquímica Ácidas y Oxigenadas. Sus materiales en los perfiles de meteorización son ferrosialtíticos.

Agradecimientos

Al laboratorio acreditado Elio Trincado de la Empresa Geominera Oriente, por la realización de las determinaciones químicas a través de la técnica analítica con plasma acoplado por inducción (ICP). A los laboratorios Bondar Clegg, Chemex Labs, Ultratrace, QNI, por realizar los controles externos. Expresamos nuestro reconocimiento y gratitud a los dos árbitros, quienes revisaron minuciosamente el artículo, por sus atinadas sugerencias que nos permitieron mejorar la forma y el contenido del manuscrito.

Referencias

- Bucher, K.; Stober, I.; Muller, H. 2015. Weathering crusts on peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 169, No. 52. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Chang Rodríguez, A. 2013. Nuevos resultados químicos que caracterizan al perfil de alteración saprolítico del yacimiento de níquel San Felipe, Camagüey, Cuba. *Revista científica cubana de geociencias*, No. 1, octubre, pp. 39-50. ISSN 2310 – 0060.
- Chang Rodríguez, A.; Rojas Purón, A. 2015a. Fases minerales portadoras de níquel en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe. *Revista Minería & Geología*. ISSN 1993 8012. Vol. 31, No. 4, pp. 1-18.
- Chang Rodríguez, A.; Tauler Ferre, E.; Lavaut Copa, W.; Rojas Purón, A. L.; Proenza Fernández, J. A. 2015b. Caracterización geoquímica del perfil litológico del yacimiento laterítico de níquel “San Felipe”, Camagüey, Cuba. *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*. ISSN 1729-3790. Vol. 16, No. 2, pp. 134-146.
- Chang Rodríguez, A.; Tauler Ferre, E.; Proenza Fernández, J. A.; Rojas Purón, A. L. 2016a. Mineralogía del yacimiento laterítico niquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba. *Revista Minería & Geología*. ISSN 1993 8012. Vol. 32, No. 1, pp. 28-47.
- Chang Rodríguez, A. 2016b. Caracterización geoquímica y mineralógica de la corteza de meteorización del yacimiento San Felipe. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias geológicas. Pp. 135. La Habana.
- Formell Cortina, F.; et al. 1998. Reporte geológico. Primera fase de perforación. Informe inédito de San Felipe Mining Ltd., 198 págs.
- Formell Cortina, F.; et al. 1999. Informe III Comité de Administración. Inédito. Geominera SA-San Felipe Mining Ltd., 167 págs.
- Golightly, J. P. 2010. Progress in understanding the evolution of nickel laterites. *Econ. Geol. Spec. Pub.*, 15, pp. 451-485.
- Guinsburg, I. I. 1946. Intemperización por etapas de los minerales. En el boletín: Cuestiones de la mineralogía, geoquímica y petrografía, pp. 122-132, AC URSS, Moscú.
- Lavaut Copa, W. 1987. Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias geológicas. Pp. 165. Archivo E.G.S. Moscú.

- Lavaut Copa, W. 1998. Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. *Minería y Geología*, Vol. 15, No. 1, pág. 9-16.
- Lavaut Copa, W. 2004. Patrones de meteorización de rocas ofiolíticas de Cuba Oriental: su importancia para la minería. *Minería y Geología*, Vol. 20, Nos. 3-4, pp. 3-14.
- Lavaut Copa, W. 2015. Las bajas concentraciones metalíferas: Reto de la actividad minero-metalúrgica cubana. *Revista Geoinformativa*, ISSN 2222-6621. Vol. 9, No. 1, pp. 12-21.
- Muñoz Gómez, J. N.; Rojas, A.; Díaz, R. 2007. La migración geoquímica del níquel en las cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas: implicaciones en la exploración de explotación. *Memorias en CD ROM*, ISBN 978-959-7117-16-2, Geociencias (II), pp. 1-10. La Habana, 20-23 de Marzo.
- Perelman, A. I. 1972. *Geoquímica de los elementos en la zona de hipergénesis*. Ed. Nedrá, Moscú, 422 págs.
- Proenza Fernández, J.A. 2015. Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. *Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla*, 20, 1-7, ISSN 1885-7264.
- Wilson, M. J. 2004. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. *Clay Minerals* 39, pp. 233–266.
- Zimmermann, A. 1984. Lateritas ferroniquelíferas de la altiplanicie San Felipe. Informe inédito, EGMC, 56 págs.

Acerca de los autores:

Alfonso Chang Rodríguez: Máster en Ciencias geológicas desde 2002, obtenido en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Ingeniero geoquímico, graduado de la Universidad Estatal de L'vov, Ucrania. Especialista "A" en geología en la Empresa Geominera Camagüey. Profesor Auxiliar de la Universidad Camagüey y del ISMM Moa. Investigador Auxiliar del IGP y CIPIMM.

Waldo Damián Lavaut Copa: Ingeniero Geólogo (1975) y Doctor en Ciencias Geológicas (1987), obtenidos en MGRI (Rusia). Geólogo Experto del MINEM (1990). Especialista geólogo A en EGMO y el Instituto de Geología y Paleontología.