

Alteraciones relacionadas con la mineralización sulfurosa de los yacimientos Júcaro y Yagruma, occidente de Cuba

Alterations related to the sulphurous mineralization of the Júcaro and Yagruma deposits, West of Cuba

Iris Álvarez-Ortiz^{1*}, Esther María Cruz-Gámez¹, José F. Lastra-Rivero¹,
Fernando Velasco-Tapia²

¹Universidad de Pinar del Río, Cuba.

²Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

*Autor para la correspondencia: iris@upr.edu.cu

Resumen

El presente trabajo, a partir del estudio comparativo (textural, mineralógico y geoquímico) de las alteraciones en las rocas relacionadas a los yacimientos Júcaro y Yagruma (formación Encrucijada), ofrece nueva información sobre las asociaciones minerales, particularidades de los procesos hidrotermales en estos depósitos y tipos de alteración. La alteración diagenética se encuentra relacionada con calcita, clorita, pirita, albita, cuarzo y zeolita; tiene carácter regional y se distribuye en toda la formación, manifiesta una tendencia general a valores mayores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ e inferiores en $\text{FeO}^t+\text{MgO}_{(\text{adj})}$, con índice de alteración (AI) entre 18 y 40. La hidrotermal se presenta sobre todo en basaltos más relacionados al yacimiento Júcaro (estratoligados) y a los *sills* sinvolcánicos de diabasas y basaltos del yacimiento Yagruma (zona de conductos); están presentes los valores más bajos de $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ y mayores en $\text{FeO}^t+\text{MgO}_{(\text{adj})}$, con AI entre 26 y 52. El estudio reveló que la alteración hidrotermal es de baja intensidad, con la asociación de minerales típicos descritos para este proceso en los VMS (*Volcanic-Massive Sulfide*): clorita, calcita, pirita, cuarzo, sericita y epidota. Se corrobora que en ambos depósitos las alteraciones minerales son similares, solo que en Júcaro predomina clorita-calcita-pirita-sericita y en Yagruma clorita-pirita-calcita-sericita-epidota-cuarzo.

Palabras clave: alteración diagenética; alteración hidrotermal; sulfuros masivos volcánogenicos; índices de alteración; formación Encrucijada; Bahía Honda.

Abstract

The present work offers new information on the mineral associations, particularities of hydrothermal processes and types of alteration from a comparative study (mineralogical, textural and geochemical) of alterations in rocks from Júcaro and Yagruma deposits (Encrucijada Formation). The diagenetic alteration is related to chlorite, pyrite, calcite, albite, quartz and zeolite, has a regional character and is distributed throughout the Formation, showing a general trend to higher values of $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$ (adj) and lower in $\text{FeO}t + \text{MgO}$ (adj), with alteration index (AI) between 18 and 40. The hydrothermal alteration occurs mainly in basalts more related to the Júcaro deposit (stratabound) and to the volcanic sills of diabase and basalts of the Yagruma deposit (conduit zone); the lowest values of $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$ (adj) and higher are present in $\text{FeO}t + \text{MgO}$ (adj), with AI between 26 and 52. The study revealed that the hydrothermal alteration is of low intensity with the association of typical minerals described for this process in the VMS (Volcanic-Massive Sulfide): chlorite, calcite, pyrite, quartz, sericite and epidote. It is corroborated that the mineral alterations are similar in both deposits, just in Júcaro chlorite-calcite-pyrite-sericite predominates and chlorite-pyrite-calcite-sericite-epidote-quartz in Yagruma.

Keywords: diagenetic alteration; hydrothermal alteration; Massive volcanogenic sulphides; alteration rates; stratabound formation; Honda Bay.

1. INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra situada en la parte noroeste de la provincia de Artemisa, en la región de Bahía Honda, occidente de Cuba (Figura 1). Desde el punto de vista geológico corresponde al denominado Terreno Zaza, interpretado como un alóctono (Pszczólkowski 1971; Pardo 1975; Mossakovski y Albear 1979). En la zona afloran rocas ofiolíticas (Figura 1); parte de su complejo de basaltos se ha reconocido como formación Encrucijada (Cretácico Inferior-Albiano al Cretácico Superior-Cenomaniano; según Léxico Estratigráfico de Cuba de 2013). En ella se aloja la mineralización de los yacimientos Júcaro y Yagruma.

Simón (1987) agrupó a estos depósitos y otros presentes en la región (Cacarajícara, Mendieta, etc.) en la Zona Metalogénica Bahía Honda,

caracterizada por sulfuros masivos volcanogénicos (VMS tipo Chipre) de Cu con Zn y Au-Ag, relacionados con un magmatismo toleítico del tipo MORB (Cruz-Gómez 1993; Cruz-Gómez y Simón 1997). Recientemente, Torres-Zafra, Lavaut-Copa y Cazañas-Díaz (2017) los incluyó en los VMS máfico-ultramáfico formados en ambientes de suprasubducción.

Varios trabajos en el área de estudio se han encaminado principalmente a la búsqueda y pronóstico de sulfuros de Cu, dentro de los que se pueden citar: Volodin y Stepanov (1967), Kulikov (1972), Escobar (1973), Maximov *et al.* (1979) y Estévez-Cruz (1999). Cruz-Gómez (1993) expone un modelo explicativo del desarrollo del complejo de basaltos de la región de Bahía Honda y su relación con los sulfuros (VMS), donde, además, caracterizó las alteraciones relacionadas con la mineralización alojada en la formación Encrucijada. Reporta la presencia de silicificación, cloritización, epidotización, hematización y carbonatación asociada a los sulfuros y otras alteraciones en los minerales formadores de los basaltos y su vidrio volcánico. En el presente trabajo, a partir del estudio comparativo (textural, mineralógico y geoquímico) de esas alteraciones en las rocas relacionadas a los yacimientos Júcaro y Yagruma, se ofrece nueva información sobre las asociaciones minerales, particularidades de los procesos hidrotermales en estos depósitos y tipos de alteración.

Se ha reportado que estas asociaciones minerales constituyen información valiosa de los procesos mineralizantes y son índice indirecto para la prospección de yacimientos minerales VMS, debido a que invariablemente se encuentran vinculadas a las zonas de alimentación (conductos verticales) y estrato-controladas del contorno económico de los yacimientos.

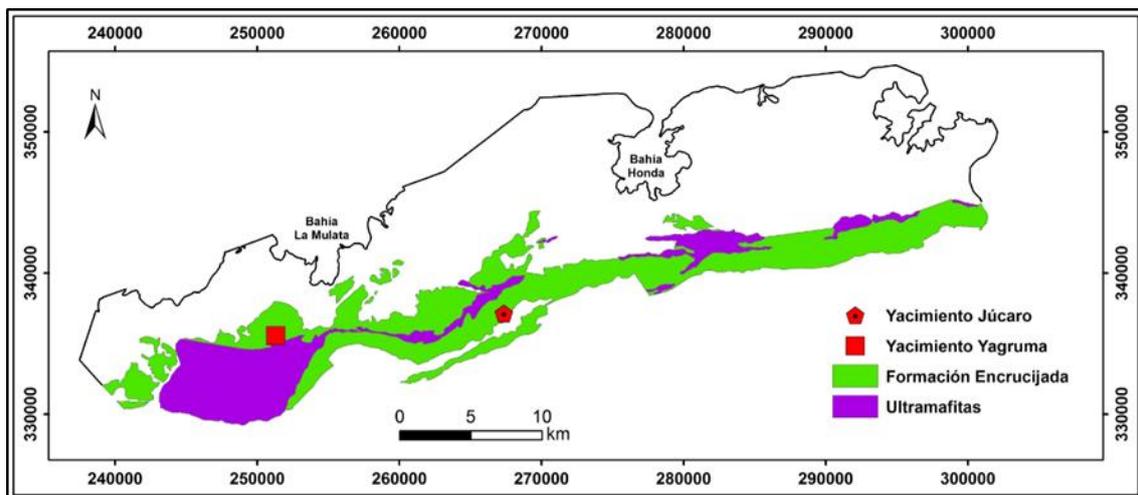


Figura 1. Mapa de ubicación de los yacimientos Júcaro y Yagruma en la región de Bahía Honda (Pinar del Río), occidente de Cuba. Se destaca parte de

la asociación ofiolítica (ultramafitas y rocas de la formación Encrucijada). Tomado de García y Delgado (2005) con modificaciones.

1.1. Geología de los yacimientos Júcaro y Yagruma

Los yacimientos Júcaro y Yagruma corresponden fundamentalmente a basaltos y diabasas de la formación Encrucijada. El yacimiento Júcaro (explotado parcialmente) se ubica a unos 12 km al suroeste de la ciudad de Bahía Honda (Figura 1). Los cuerpos minerales tienen forma lenticular, con 300 m-350 m por el rumbo y espesores de 1 m a 40 m, predominando las menas estratiformes masivas.

En la región del yacimiento el buzamiento de las rocas varía al noreste (40°-60°) y se manifiestan zonas de trituración, brechamiento y agrietamiento. Estas zonas se desarrollan en los contactos con los cuerpos minerales (Cruz-Gómez 1993). El yacimiento Yagruma (sin explotar) se encuentra a unos 300 m de la carretera La Palma-Bahía-Honda (Figura 1). Los cuerpos minerales con buzamiento al noreste (36°-84°) son irregulares, de espesor muy variable y con intercalaciones estériles, llegando a alcanzar hasta 130 m por el rumbo y 60 m-70 m por el buzamiento. Igualmente, son típicas las menas de *stock-work* (Cruz-Gómez 1993). En las menas de ambos yacimientos se han observado huellas o espejos de deslizamiento, atestiguando que los efectos de los movimientos tectónicos son posteriores a su formación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estableció una metodología que incluyó: (a) trabajo de campo: localización y descripción de las rocas de la Fm. Encrucijada y sus alteraciones; (b) análisis mineralógico: reconocimiento de texturas, identificación de minerales en lámina delgada y sus asociaciones (25 muestras, Tablas 1 y 2); (c) recopilación de 22 análisis químico de roca total (elementos mayores -% en peso; Cruz-Gómez 1993): confección de los diagramas: (1) AI [índice de alteración Ishikawa= $100 \frac{(K_2O+MgO)}{(K_2O+MgO+Na_2O+CaO)}$]- CCPI [índice de carbonato, clorita, pirita= $100 \frac{(MgO+FeO)}{(MgO+FeO+Na_2O+K_2O)}$] (según Ishikawa *et al.* 1976), (2) $Na_2O+CaO_{(adj)}$ - AI, y (3) $FeO^{(t)}+MgO_{(adj)}$ - AI para efectos de evaluar geoquímicamente las alteraciones estudiadas; (d) análisis estadístico: con la finalidad de identificar dominios de alteración, se aplicó el análisis de clúster por observaciones utilizando los elementos mayores ajustados (SiO_2 , FeO^t , MgO y K_2O); y (d) procesamiento de la información.

3. RESULTADOS

3.1. Descripción de las litologías

Las rocas magmáticas relacionadas con los yacimientos estudiados son basaltos y diabasas (Figura 2). A partir del análisis petrográfico y los datos resumidos en las Tablas 1 y 2 se puede realizar la siguiente caracterización:

- Basaltos: poseen texturas afíricas y porfíricas, los fenocristales son de plagioclasa y clinopiroxeno, mientras que en la matriz (tipo intersertal) predominan microlitos de plagioclasa y vidrio volcánico (Tabla 1). Los piroxenos, en ocasiones, están sustituidos por clorita y calcita y a veces muestran cristales alargados y fibrosos. Es típico percibir en estas rocas la plagioclasa desanortizada y sericitizada. Además de rellenar vesículas, la clorita, la calcita y el cuarzo también se presentan en vetillas acompañados de albita. Por lo general, muestran devitrificación del vidrio y minerales del grupo de la zeolita, con pirita y algunos agregados de óxidos de Fe. Estas rocas son las más comunes de la Fm. Encrucijada y en el yacimiento Júcaro (Figura 2, izquierda).
- Diabasas: muestra una mineralogía similar a los basaltos (plagioclasa y clinopiroxeno; Tabla 2), las texturas son ofítica y subofítica (Figura 2, derecha), lo que presupone correspondan a típicos *sills* sinvolcánicos. Estas rocas son comunes en el yacimiento Yagruma y muestran minerales de alteración como la clorita, calcita, pirita, sericita, epidota y cuarzo (Tabla 2), que ocurren fundamentalmente en vetillas y se acompañan de pirita. Algunas poseen vidrio volcánico escaso (doleritas).

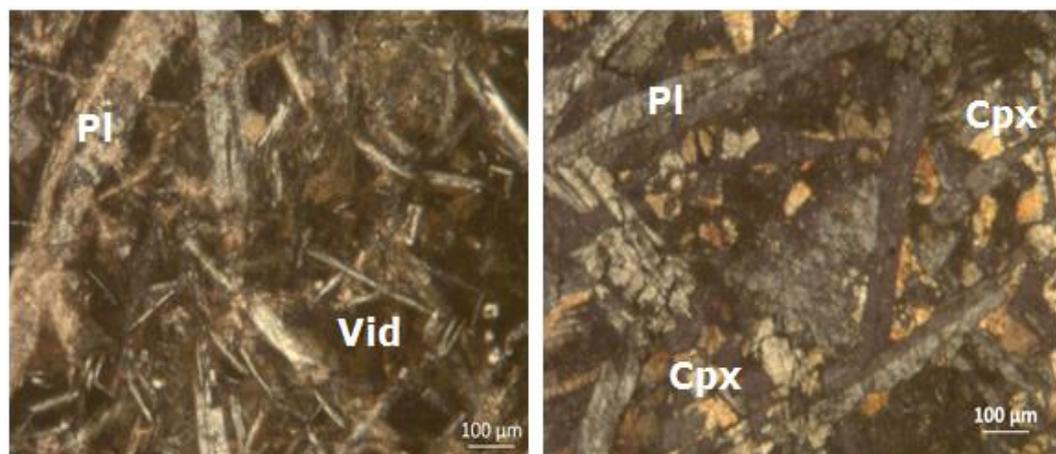


Figura 2. Microfotografías de rocas típicas de la Fm. Encrucijada (Bahía Honda). Basalto porfídico con plagioclasa y vidrio volcánico, la matriz tiene relaciones texturales del tipo intersertal (izquierda; muestra 60012,

CN, 10x; Tabla 1), y diabasa con plagioclasa y clinopiroxeno mostrando textura ofítica (derecha; muestra 4019 CN, 10x; Tabla 2).

Tabla 1. Composición modal (%) de las rocas de la formación Encrucijada relacionadas al yacimiento Júcaro (Bahía Honda)

No Figura 4a	Minerales/ Muestras	Pl	Cpx	Qtz	Chl	Cal	Ep	Ser	Zeo	Ab	Pg	Vid	Py	Ox Fe
1	303	40	32	...	3	3	...	...	...	...	...	12	10	...
2	34	35	28	1	6	5	...	...	...	1	...	16	8	...
3	60 271	43	33	...	2	2	...	...	...	...	...	10	10	...
4	60 589	30	20	1	15	10	...	3	...	1	...	18	2	...
5	604 233	45	10	...	11	3	...	5	...	...	...	18	8	...
6	513 236	45	25	...	5	3	...	...	2	...	...	10	10	...
7	504 169	35	33	3	4	3	...	2	...	2	...	10	8	...
8	51 583	55	...	2	11	10	3	...	...	2	...	15	2	...
9	512 101	43	35	...	5	5	...	...	1	1	...	5	4	1
10	50 797	48	5	...	3	10	...	...	...	...	...	20	3	11
11	50 175	33	17	5	5	5	...	10	...	2	...	20	3	...
12	60 012	44	10	...	4	3	...	...	...	...	...	36	3	...
13	1	45	10	1	3	5	1	...	1	1	...	30	3	...
14	202	30	25	...	8	7	...	...	...	...	...	15	15	...
15	203	...	...	5	...	30	...	...	...	...	10	45	...	10

Nota: Pl- plagioclasa (An 39-47), Cpx- clinopiroxeno, Qtz- cuarzo, Chl- clorita, Cal- calcita, Ep- epidota, Ser- sericita, Zeo- zeolita, Al- albita, Pg- palagonita, Vid- vidrio volcánico, Py- piritita y OxFe- óxidos de Fe.

Tabla 2. Composición modal (%) de las rocas de la formación Encrucijada relacionadas al yacimiento Yagruma (Bahía Honda).

No Figura 5a	Minerales/ Muestras	Pl	Cpx	Qtz	Chl	Cal	Ep	Ser	Ab	Vid	Py
1	3 610	40	28	...	15	10	2	2	...	...	3
2	2 229	35	14	3	8	10	2	1	1	10	16
3	4 218	45	16	2	7	8	...	2	...	12	8
4	3 914	44	27	2	15	3	1	...	...	...	8
5	4 019	40	35	...	10	8	...	4	...	...	3
6	449	27	...	5	20	10	8	3	...	10	17
7	2 121	35	27	2	10	7	1	3	2	8	5
8	268	40	26	1	7	6	...	2	2	11	5
9	1 170	37	27	1	12	2	2	3	...	10	6
10	36 157	5	3	30	12	...	35	...	10	...	5

3.2. Alteraciones

Por observaciones de campo, muestras de mano y análisis petrográfico (Tablas 1 y 2) se ha podido diagnosticar, basado en el arreglo de minerales, las siguientes alteraciones en las rocas relacionadas con los yacimientos Júcaro y Yagruma: devitrificación, desanortización, sericitización, zeolitización, silicificación, carbonatación, cloritización, albitización, epidotización, piritización y hematización.

Devitrificación: constituye la pérdida del color y la birrefringencia del vidrio en los basaltos, así como una reorganización de su textura a fracturas perlíticas, formación de palagonita y geles de sílice, todo por efectos de la hidratación del vidrio (Figura 3a). Usualmente, rasgos de esa textura han sido borrados por posteriores procesos de alteración en los basaltos.

Desanortización: afecta a la mayoría de las plagioclasas. Consiste en una pérdida del calcio y enriquecimiento de Na, reflejado en la variación del contenido de anortita (An). Las mediciones se hicieron por el método de Michel Levi, resultando valores de An entre 39 y 47, inferiores a los observados para plagioclasas en basaltos típicos ($An > 50$, según Streckeisen 1978). Además, se distinguen con bordes muy corroídos y pérdida de sus planos de maclas (Figura 3b).

Sericitización: se da a partir de la sustitución de las plagioclasas por hidrómica y arcillas (Figura 3c). Se percibe en agregados muy finos sobre este mineral, provocando irregularidades en los bordes de los cristales y planos de maclas. Es común en las rocas estudiadas (Tablas 1 y 2).

Zeolitización: las zeolitas se presentan en agregados irregulares rellenando espacios, sustituyendo al vidrio volcánico y en forma de finas vetas. Es común su asociación con la clorita y la calcita (Tabla 1).

Silicificación: este proceso de alteración está más relacionado a Yagruma. Los cristales de cuarzo rellenan espacios y también ocurren en vetas junto a la clorita, epidota y piritita (Tablas 1 y 2; Figura 3d).

Albitización: forman agregados cristalinos dispersos en la roca y también en vetas junto al cuarzo, clorita y calcita; es una alteración de poco desarrollo en las rocas estudiadas (Tablas 1 y 2).

Carbonatación: ocurre sustituyendo a las plagioclasas, rellenando oquedades de la roca y vesículas (Figura 3e). El mineral principal es la calcita y alcanza frecuentemente hasta el 10 % en las rocas (Tablas 1 y 2); también se aprecia en vetas acompañadas de cuarzo, epidota, clorita y sulfuros (pirita fundamentalmente).

Cloritización: se registra principalmente sustituyendo al vidrio, a los piroxenos y plagioclasas. Forman agregados irregulares sobre los cristales minerales, rellenando oquedades y vetas (Figura 3f). A menudo se asocia a la carbonatación y es una alteración muy común en las rocas estudiadas (Tablas 1 y 2).

Epidotización: es más habitual en las rocas relacionadas con Yagruma (Tablas 1 y 2). Se percibe, generalmente, sustituyendo a las plagioclasas, rellenando vacuolas y también en vetas junto al cuarzo y calcita. Se manifiesta con granos desde anhédricos a subhédricos (Figuras 3g y 3h). Asimismo, se reconoció clinzoicita, pero en menor proporción.

Piritización: es muy frecuente y logra alcanzar hasta el 17 % en las rocas, aparece en granos muy pequeños y diseminados (Tablas 1 y 2). También se encuentra en vetas, asociada a otros minerales de alteración (cuarzo, Figura 3d).

Hematización: surge en masas irregulares en las rocas y su desarrollo se debe a la formación de óxidos de hierro durante la deposición de sulfuros. En el yacimiento Júcaro, Cruz-Gámez (1993) señaló que esta alteración se ubica en el pendiente del cuerpo mineral principal, vinculada con la piritización.

Las Figuras 4a y 5a muestran una representación de estas alteraciones, obtenidas a partir de los resultados petrográficos. Se contempla cómo en las rocas vinculadas a ambos yacimientos existe evidencia de cloritización, carbonatación, sericitización y piritización y muestran una distribución aleatoria. En una revisión de las Tablas 1 y 2 resalta, en las muestras relacionadas con Yagruma, la epidotización y silicificación.

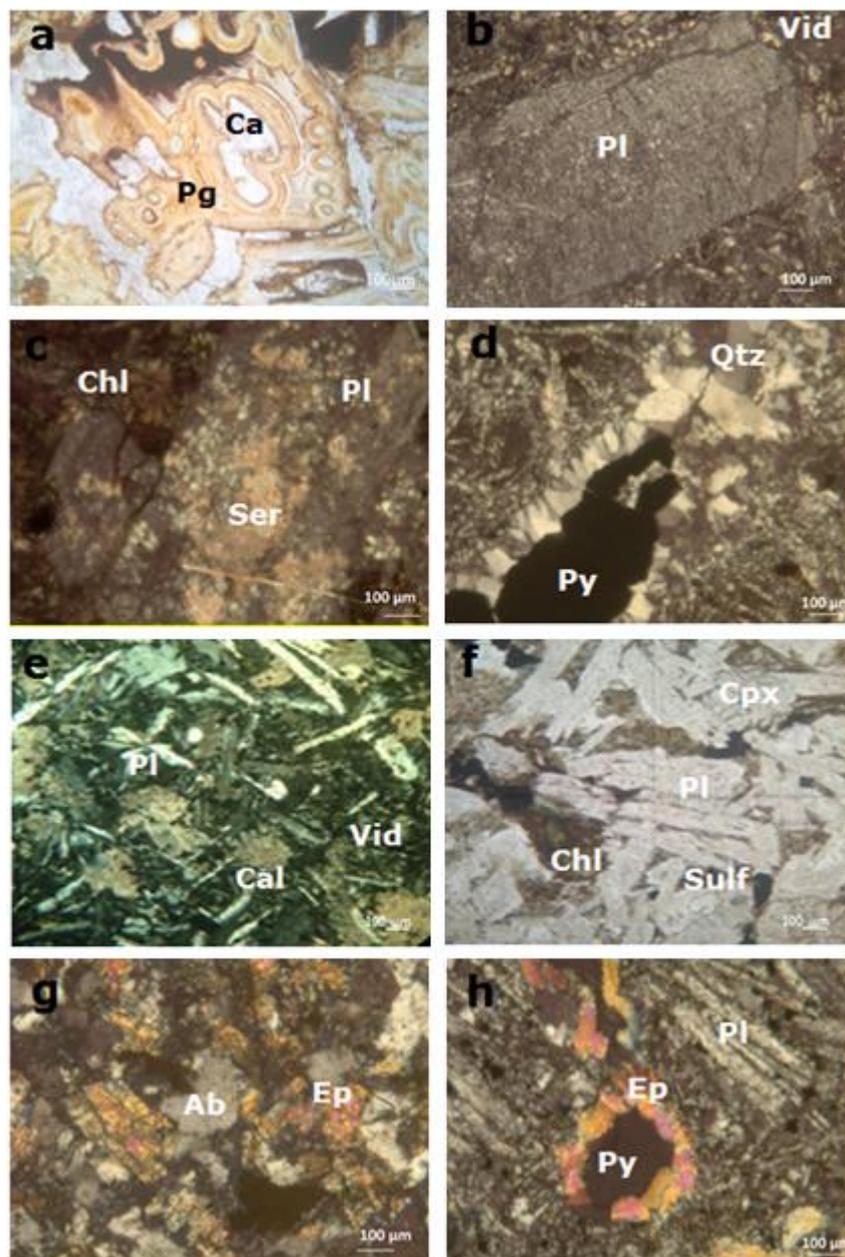


Figura 3. Microfotografías de alteraciones en rocas relacionadas a los yacimientos Yagruma y Júcaro (Fm. Encrucijada) en la zona de Bahía Honda; a) Devitrificación en un basalto, mostrando la presencia de bandas concéntricas de palagonita y calcita (muestra 203, SN, 10x); b) Aspecto de un fenocristal de plagioclasa desanortizada (muestra 202 CN, 10x); c) Proceso de sericitización en un cristal de plagioclasa, también se observa un agregado radial de clorita sustituyendo al vidrio volcánico en la matriz de la roca (muestra 50175, CN, 10x); d) Veta de sulfuro (pirita) y cuarzo cortando la roca, también los microlitos de feldespatos se encuentran sericitizados (muestra 212, CN, 10x); e) Proceso de carbonatación a partir del vidrio volcánico y las plagioclasas, se distinguen también cristales muy finos de pirita dispersos en toda la roca (muestra 2229, CN, 10x); f) Agregados de clorita relleno de oquedades en la roca

(muestra 4019, SN, 10x); g) Roca epidotizada con algunos cristales de albita (muestra 36157, CN, 10x) y h) Pirita y epidota relleno de vacuolas y fracturas en la roca. En la matriz hay sílice criptocristalina y en los extremos izquierdo y derecho cristales de pirita (muestra 449, CN, 10x).

3.3. Geoquímica de las rocas

Los datos de óxidos mayores utilizados en el trabajo sirvieron de base para realizar diagramas que evalúan las particularidades químicas, así como el grado de alteración de las rocas vinculadas a los yacimientos Júcaro y Yagruma (Figuras 4 y 5). En las Figuras 4b y 5b se muestra un análisis jerárquico de agrupamiento, el cual permite efectuar la distribución del conjunto de rocas estudiadas en dos dominios geoquímicos en cada uno de ellos (DJ1, DJ2 en Júcaro y DY1, DY2 para Yagruma), cuyas características fueron complementadas por los patrones obtenidos en los diagramas: $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}/\text{AI}$, $\text{FeO}^{(\text{t})}+\text{MgO}_{(\text{adj})}/\text{AI}$ y CCPI/AI (Large, Gemmell y Paulick 2001; Figuras 6 y 7), y la presencia de minerales de alteración en las rocas (composición modal en Tablas 1 y 2; Figuras 4a y 5a).

En los DJ1 y DY1 están las muestras 1, 2, 3, 9 y 12 de Júcaro, y 2, 3 y 8 relacionadas a Yagruma. Se caracterizan por tener porcentajes bajos en minerales de alteración (Figuras 4a y 5a); además la mayoría se ubican en el campo diagenético (Large, Gemmell y Paulick 2001; Figura 7), específicamente, entre las zonas correspondientes a rocas alteradas por la interacción agua de mar/roca a baja temperatura del tipo: albita-calcita-epidota, y albita-clorita.

Al segundo dominio (DJ2 y DY2) pertenecen las muestras 4, 5, 6, 7, 8 y 10 de Júcaro, y 1, 4, 5, 6, 7 y 9 de Yagruma. El mismo posee porcentajes altos de minerales de alteración (Figuras 4a y 5a), clasificando como rocas de la zona de basalto-andesita de baja alteración hidrotermal con desarrollo de asociaciones carbonato-sericita, con leve tendencia a la de clorita-pirita-sericita (Large, Gemmell y Paulick 2001; Figura 7). Las muestras 11 y 13 (Júcaro, Figura 4b) no se han incluido en los dominios anteriormente mencionados, corresponden a la de mayor ($\text{AI}= 51,49$ y $\text{CCPI}= 86,21$) y menor ($\text{AI}= 18,20$ y $\text{CCPI}= 32,08$) grado de alteración de todas las estudiadas (Figuras 6 y 7).

Las sumas de $\% \text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ y $\% \text{FeO}^{(\text{t})}+\text{MgO}_{(\text{adj})}$ decrecen y crecen, respectivamente, según la intensidad de alteración en las rocas (Large, Gemmell y Paulick 2001); también los valores de AI evalúan el grado de alteración de una roca. Según estos indicadores se ha constatado que las rocas incluidas en DJ1 y DY1 poseen valores mayores de $\% \text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$

(14,56-22,39), más bajos de %FeO^(t)+MgO_(adj) (11,19-17,50) y AI entre 18,20-38,73, con relación a los correspondientes a DJ2 y DY2 (Tabla 3; Figura 6 a y b). En estos últimos, los valores de dichas sumas corresponden a: %Na₂O+CaO_(adj) (10,09-18,26), %FeO^(t)+MgO_(adj) (11,06-19,78) y AI entre 20,18-46,22.

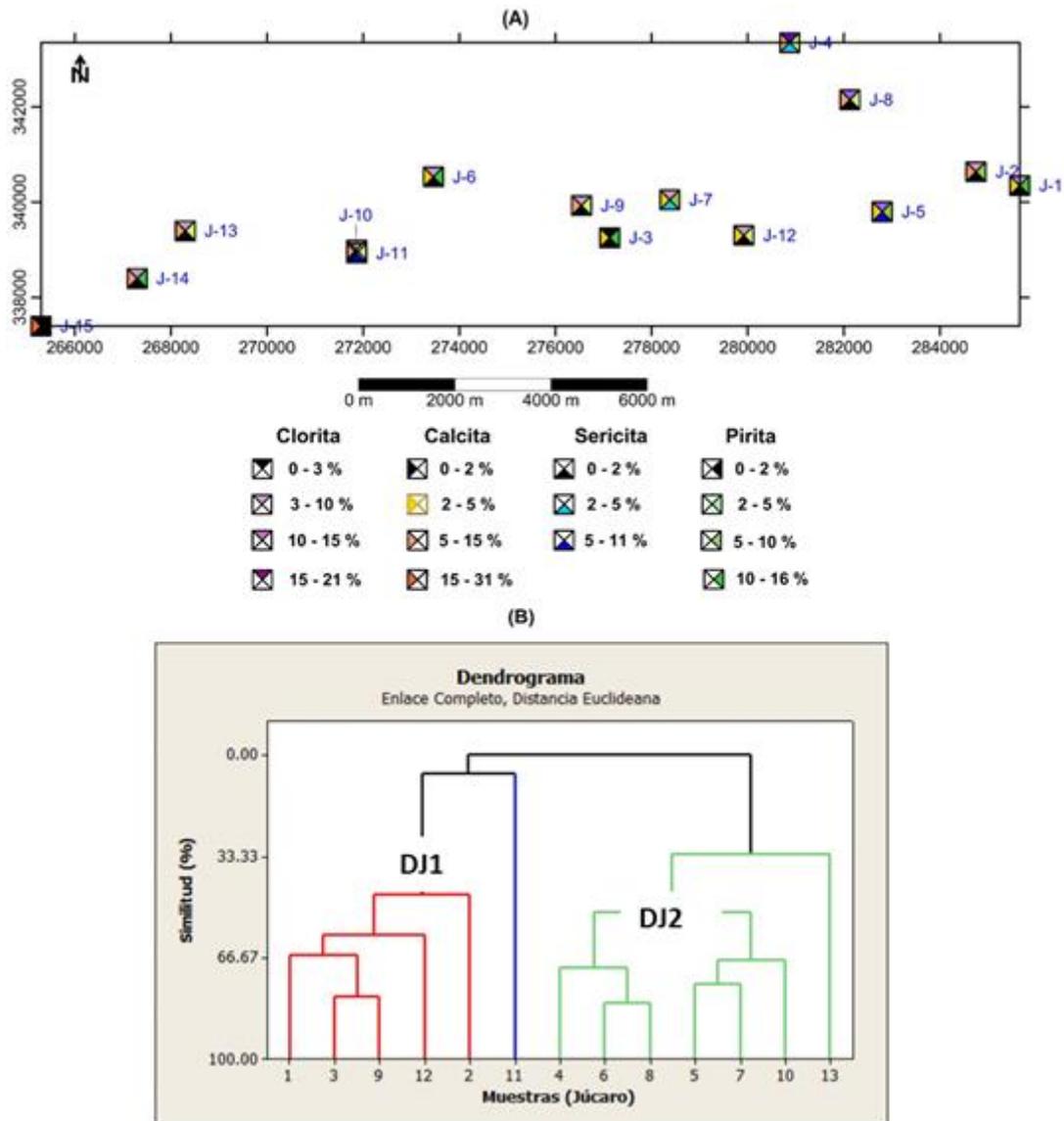


Figura 4. a) Ubicación de las rocas relacionadas al yacimiento Júcaro y representación de sus alteraciones (Tabla 1); b) Dendrograma que muestra los resultados del análisis jerárquico de agrupamientos (considerando análisis de clúster, Bratchell 1989). DJ- dominios Júcaro, en Tabla 1 ver las etiquetas de las muestras.

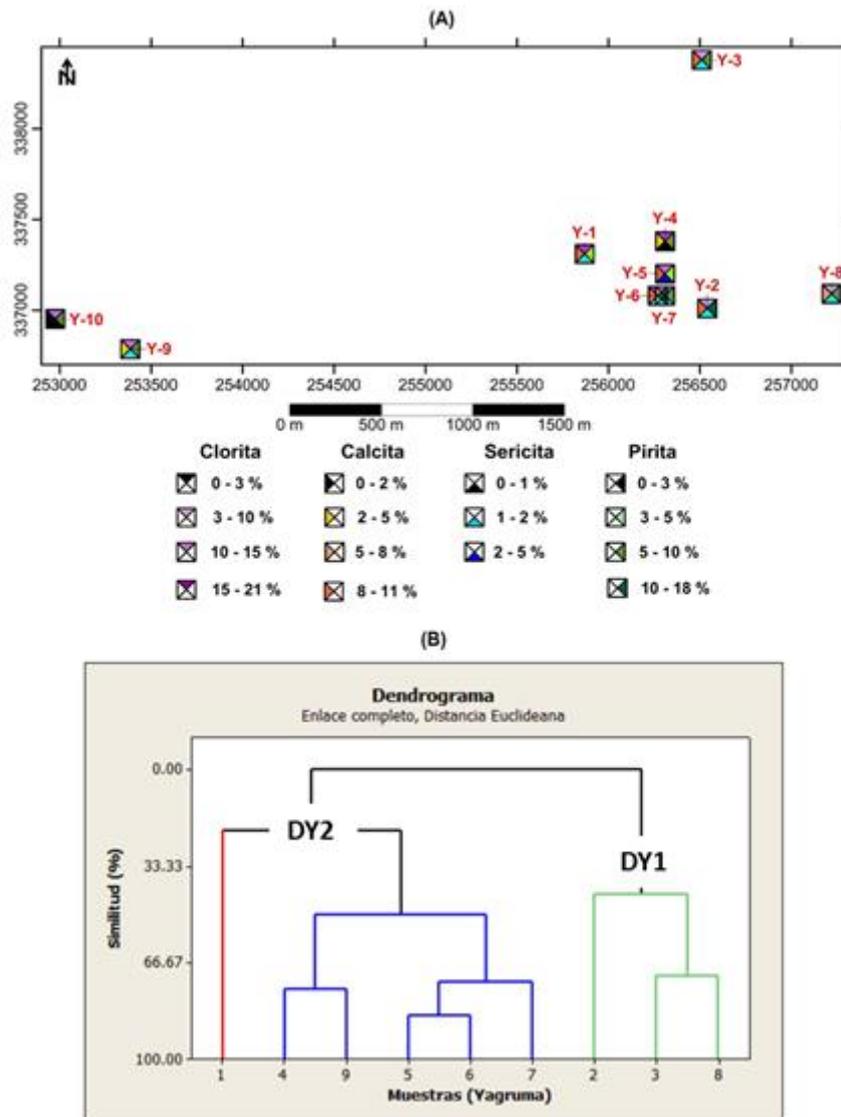


Figura 5. a) Ubicación de las rocas relacionadas al yacimiento Yagruma y representación de los minerales de alteración (Tabla 2); b) Dendrograma que muestra los resultados del análisis jerárquico de agrupamientos (considerando análisis de clúster, Bratchell 1989). DY-dominios Yagruma, en Tabla 2 ver las etiquetas de las muestras.

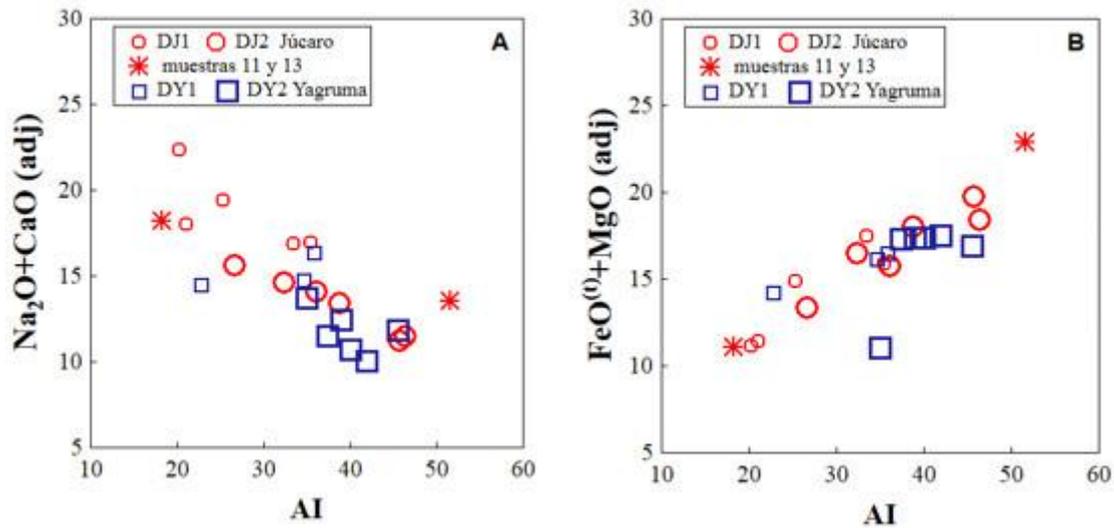


Figura 6. Diagramas $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}/\text{AI}$; (a) y $\text{FeO}^t+\text{MgO}_{(\text{adj})}/\text{AI}$; (b) para las rocas de la Fm. Encrucijada relacionada con los yacimientos Júcaro y Yagruma (Bahía Honda), según Large, Gemmell y Paulick (2001). Existe una tendencia general en los DJ1 y DY1 a valores mayores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ e inferiores en $\text{FeO}^t+\text{MgO}_{(\text{adj})}$ en relación con AI, y viceversa en los DJ2 y DY2. La muestra 13 es la menos alterada (AI= 18,20) del grupo estudiado y la 11 la de mayor AI (51,49).

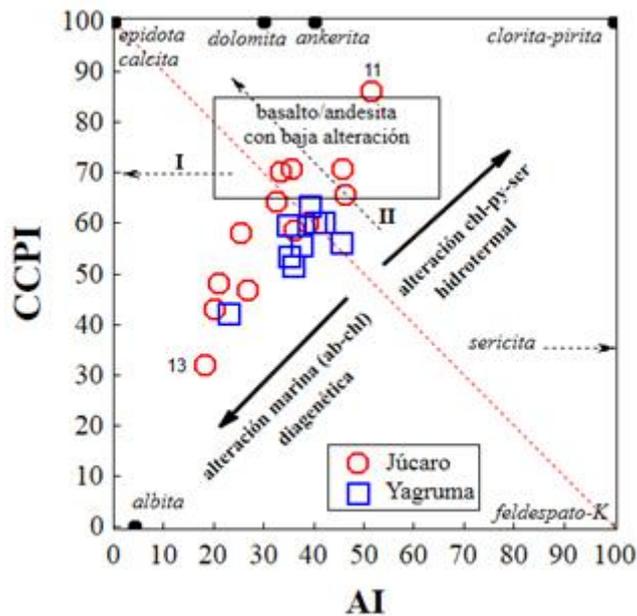


Figura 7. Diagrama AI- CCPI para las rocas del Fm. Encrucijada relacionada a los yacimientos Júcaro y Yagruma (Bahía Honda). Las muestras ploteadas se ubican en Figuras 4a y 5a. Se distribuyen en tres campos (Large, Gemmell y Paulick 2001): alteración diagenética, rocas con baja alteración hidrotérmal (basalto-andesita) e hidrotérmal. Tendencias de alteración según estos mismos autores: I- albite-calcita-epidota, y II- calcita-sericita. Muestras 11 y 13 son las de mayor y menor alteración, respectivamente (Figuras 4b y 6).

4. DISCUSIÓN

Petrográficamente se observaron en los basaltos y diabasas de la Fm. Encrucijada evidencias de asociaciones minerales, que corresponden a alteraciones descritas en la literatura afines a los yacimientos VMS (Morton y Franklin 1987; Corbett y Leach 1998; Large, Gemmell y Paulick 2001; Tagle y Alt 2004; Gifkins, Herrmann y Large 2005; Pirajno 2010; Sharma 2014).

Las Tablas 1 y 2 exhiben las particularidades de la presencia y abundancia de los minerales en las rocas relacionadas a cada depósito mineral (Júcaro y Yagruma). Se constata la presencia de varias alteraciones: devitrificación, desanortización, sericitización, zeolitización, silicificación, carbonatación, cloritización, albitización, epidotización, piritización y hematización; las cuales atestiguan la existencia de circulación de soluciones hidrotermales por las rocas de esta formación.

En la Tabla 3 se reportan los rasgos principales de las alteraciones estudiadas a partir de los resultados petrográficos y geoquímicos. Inicialmente, la devitrificación ocasionada por la hidratación del vidrio generó fracturas necesarias para la posterior circulación del agua marina y la formación de soluciones; proceso ampliamente reportado en la literatura (Humphris y Thompson 1978; Gardoll 2001; Schardt *et al.* 2001). Se comprueba la presencia de alteraciones de los tipos diagenética e hidrotermal.

- diagenética (de carácter regional). Se distribuye en toda la Fm. Encrucijada (Figuras 4a y 5a). La muestra 13 y las incluidas en los DJ1 y DY1 (Tablas 1 y 2; Figuras 4a y 5a) representan este proceso, también poseen un rango de valores en las sumas $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}_{(\text{adj})}$ y $\text{FeO}^{\text{t}} + \text{MgO}_{(\text{adj})}$, mayor y menor, respectivamente (Figura 6), del total de rocas analizadas. Los minerales más comunes son: calcita, clorita, pirita, sericita, albita, cuarzo (Figuras 4a y 5a);
- hidrotermal (se presupone relacionada con zonas mineralizadas), cuyos valores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}_{(\text{adj})}$ y $\text{FeO}^{\text{t}} + \text{MgO}_{(\text{adj})}$ tienen comportamiento inverso en comparación con la diagenética (Figura 6 y Tabla 3). Los minerales presentes más característicos son: clorita, calcita, pirita, sericita, hematita, cuarzo y epidota (Figuras 4a y 5a). Se agrupan aquí las muestras correspondientes a los DJ2 y DY2, así como la muestra 11 (Figuras 4b y 5b).

En la alteración diagenética los minerales rellenan fracturas perlíticas y comienza la sustitución de los minerales primarios en la roca; el proceso

más generalizado es la desanortización de las plagioclasas (Figura 3b) y está presente en toda la Fm. Encrucijada. Las alteraciones hidrotermales registradas son de baja intensidad: AI- 20 y 46, $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ - 10 y 18, y $\text{FeO}^{\text{t}}+\text{MgO}_{(\text{adj})}$ - 11 y 20 (Figuras 6 y 7; Tabla 3), probablemente se vinculan con zonas marginales a la mineralización sulfurosa estratoligada y de conductos (Large, Gemmell y Paulick 2001). Por lo antes expuesto, se propone para futuros trabajos de exploración en la región, tomando en cuenta dichas variables, que sus valores oscilen en los siguientes rangos: $\text{AI}>45$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}<13$ y $\text{FeO}^{\text{t}}+\text{MgO}_{(\text{adj})}>17$.

Por otra parte, la presencia de hematita (OxFe , Tabla 1) y epidota (Tablas 1 y 2; Figuras 3 g y h), también son importantes indicadores para la exploración. El proceso de hematización es común en las zonas superiores de los cuerpos minerales y se describen paralelas a los depósitos estratoligados (Hadjistavrinou y Constantinou 1982, citado por Pirajno 2010). También Tagle y Alt (2004) comprobaron en los sulfuros masivos de Bent Hill (Juan de Fuca Ridge) que la epidota en basaltos representa un registro de alta temperatura ($> 350^\circ$) en los fluidos hidrotermales responsables de los depósitos de esos sulfuros (Tablas 1 y 2).

Gifkins, Herrmann y Large (2005) reportaron que en los VMS los procesos de alteración son comunes bajo los cuerpos minerales, extendiéndose lateralmente varios kilómetros y hasta 30 m de espesor. Estas zonas estratoligadas originalmente también pudieran relacionarse con conductos de alteración (zona de *stock-work*), por lo general, deformadas tectónicamente y ubicadas semiparalelas a las anteriores, adoptando diversas morfologías y relaciones difusas.

Cruz-Gámez (1993) señaló que el yacimiento Júcaro es estratoligado y Yagruma representa una zona de conducto (*stock-work*). Por lo tanto, se presupone que las rocas con características a DJ2 y DY2 pudieran vincularse a dichas zonas. Todo lo cual justifica algunas diferencias en la abundancia de los minerales de alteración (Tabla 3) en las rocas relacionadas con los yacimientos Júcaro (clorita, calcita, pirita, sericita) y Yagruma (clorita, pirita, calcita, sericita, epidota, cuarzo).

Tabla 3. Alteraciones en las rocas de la Fm. Encrucijada vinculadas con los VMS (Yagruma y Júcaro). Valores de algunos óxidos en correspondencia con los dominios geoquímicos obtenidos en Figuras 4b, 5b y 6

Objeto	Proceso	Alteración	Características	Dominios geoquímicos
Vidrio volcánico	<i>Hidratación</i>	Devitrificación	Fracturas perlíticas, formación de minerales arcillosos y palagonita (Figura 3a)	---
Fm. Encrucijada	<i>Diagénesis</i> (cáncer regional)	Desanortización Carbonatación Cloritización Piritización Albitización Silicificación Zeolitización Epidotización	Sustitución incipiente de los minerales primarios (Figura 3b) y vidrio volcánico. Los minerales neoformados se alojan en fracturas perlíticas	<i>DJ1</i> N+C: 16,9-22,4 % F+M: 11,2-17,5 % AI: 18-36 Muestra 13 (AI= 18,20) <i>DY1</i> N+C: 14,5-16,4 % F+M: 14,2-16,5 % AI: 23-39
Yacimiento Júcaro	<i>Hidrotermal</i> Estratoligada	Cloritización Carbonatación Piritización Sericitización Silicificación Albitización Hematización Epidotización	Sustitución de minerales primarios (Figura 3c) y vidrio volcánico. Precipitan los minerales de alteración en vetas (Figura 3d), rellenan vacuolas (Figura 3h) y oquedades	<i>DJ2</i> N+C: 11,2-18,2 % F+M: 11,0-19,7 % AI= 20-46 Muestra 11 (AI= 51,49)
Yacimiento Yagruma	<i>Hidrotermal</i> De conducto deformado	Cloritización Piritización Carbonatación Sericitización Epidotización Silicificación Albitización	Sustitución de minerales primarios (Figura 3g) y vidrio volcánico. Precipitan los minerales de alteración en vetas y rellenan oquedades (Figura 3e)	<i>DY2</i> N+C: 10,0-12,4 % F+M: 16,9-17,5 % AI=35-45

Nota: N+C= $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$; F+M= $\text{FeO}^{(\text{t})}+\text{MgO}_{(\text{adj})}$ (porcentaje en peso).

5. CONCLUSIONES

- La circulación de soluciones hidrotermales por las rocas de la Fm. Encrucijada es reflejada por la presencia de varias alteraciones: devitrificación, desanortización, sericitización, zeolitización, silicificación, carbonatación, cloritización, albitización, epidotización, piritización y hematización. La mayoría de ellas se reportan en rocas relacionadas a los yacimientos Júcaro y Yagruma, aunque en general

predominan la cloritización, carbonatización, piritización y sericitización.

- Existen dos dominios de alteración en las rocas estudiadas: D1- alteración diagenética, con interacción agua de mar/roca a baja temperatura del tipo albita-calcita-epidota, y albita-clorita (DJ1 y DY1); y D2- alteración hidrotermal (interacción agua de mar/roca a mayor temperatura), con el desarrollo de alteraciones con cierta tendencia a carbonato-sericita, y a clorita-pirita-sericita (DJ2, DY2).
- Se manifiesta una tendencia general a valores mayores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}$ e inferiores en $\text{FeO}^{\text{t}}+\text{MgO}_{(\text{adj})}$ en las rocas menos alteradas agrupadas en los DJ1 y DY1, y viceversa para los DJ2 y DY2. Las rocas con características similares a estas últimas pueden corresponder con zonas aledañas a la mineralización sulfurada.
- Para los VMS de la región constituye un índice indirecto de búsqueda los siguientes criterios relacionados con las alteraciones: (a) abundancia de cloritización, carbonatización, piritización y sericitización, (b) presencia de epidotización (mineralización de conductos) y hematización (mineralización estratoligada), (c) valores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}_{(\text{adj})}<13$, (d) contenidos de $\text{FeO}^{\text{t}}+\text{MgO}_{(\text{adj})}>17$, y (e) valores de $\text{AI}>45$.

6. REFERENCIAS

- Bratchell, N. 1989: Cluster analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 6: 105-125.
- Corbett, G. J. y Leach, T. M. 1998: Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6, 237 p.
- Cruz-Gámez, E. M. 1993: *Papel del vulcanismo básico en la formación de los yacimientos cupro-piríticos de la zona estructuro-facial Bahía Honda. Pinar del Río*. Tesis doctoral. Universidad de Pinar del Río. 115 p.
- Cruz-Gámez, E. M. y Simón, A. 1997: Principales rasgos del complejo de Basaltos en la región de Bahía Honda. *Minería y Geología*, 14(3): 25-31.
- Escobar, E. 1973: *Completamiento con el cálculo de reservas y exploración orientativa del yacimiento Júcaro*. Pinar del Río: CNFG.
- Estévez-Cruz, E. 1999: *3D Orebody modelling and resource estimation of the Júcaro deposit. Pinar del Río*. Tesis de maestría. Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Holanda. 85 p.
- García, D. y Delgado, R. 2005: Mapa Geológico de la provincia de Pinar del Río a escala 1:100 000 en formato digital. En: 1ra Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana.

- Gardoll, S. J. 2001: Geochemical mass-transfer patterns as indicators of the architecture of a complete volcanic-hosted massive sulfide hydrothermal alteration system, Panorama District, Pilbara, western Australia. *Economic Geology*, 96: 1263-78.
- Gifkins, C.; Herrmann, W. y Large, R. 2005: *Altered volcanic rocks: a guide to description and interpretation*. Australia: Centre for Ore Deposit Research University of Tasmania. 271 p. ISBN: 1 86295 219 1.
- Humphris, S. E. y Thompson, G. 1978: Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 107-25.
- Ishikawa, Y.; Sawaguchi, T.; Iwaya, S. y Horiuchi, M. 1976: Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos: *Mining Geology*, 26: 105-117.
- Kulikov, A. 1972: Informe preliminar sobre los resultados de búsqueda-explotación de menas cupríferas realizadas en el yacimiento Júcaro y zonas adyacentes en la parte oriental de la provincia de Pinar del Río. Pinar del Río: CNFG.
- Large, R. R.; Gemell, J. B. y Paulick, H. 2001: The Alteration Box Plot: A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Lithogeochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 96: 957-971.
- Colectivo de autores. 2013: *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Maximov, A.; Mediakov, I.; Riabenko, S.; Krasnov, B.; Katae, A.; Hevia, L.; Bello, V.; Gómez, R. y Park, G. 1979: Informe sobre los resultados de los trabajos complejos geólogo-geofísicos a escala 1:50 000 en la zona de Bahía Honda. (Inédito). La Habana: Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Morton, R. L. y Franklin, J. M. 1987: Two-Fold classification of Archean Volcanic Associated Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 82(4): 1063.
- Mossakovski, A. y Albear, J. F. 1979: Estructura de cabalgamiento de Cuba occidental y norte e historia de su formación a la luz del estudio de los olistostronias y las molasas. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 1: 3-31.
- Pardo, G. 1975: Geology of Cuba. In: Nairn and Swihli (Editors). *The Ocean Basins and Margins. 3. The Gulf of Mexico and the Caribbean*. New York: Plenum Press, p. 553-615.
- Pirajno, F. 2010: *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Alemania: Springer-Verlag. 1250 p.
- Pszczółkowski, A. 1971: Jurassic, Cretaceous and Paleogene deposits of Sierra del Rosario (Cuba). *Bult. Acad. Pol. Sei., Sér. Sci. Terre*, 19(314): 249-259.

- Schardt, C.; Cooke, D. R.; Gemmell, J. B. y Large, R. R. 2001: Geochemical modelling of the zones footwall alteration pipe, Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, western Tasmania, Australia. *Economic Geology*, 96: 1037-54.
- Sharma, R. K. 2014: Hydrothermal Alteration Associated with Copper-Gold. Mineralisation at Dhani Basri, Dausa District, Rajasthan. *Journal Geological Society of India*, 84: 709-72.
- Simón, A. 1987: Zonación metalogénica del territorio de Cuba Occidental. Memorias del III Encuentro Científico Técnico de Geología. Biblioteca Universidad Pinar del Río, p. 128-136.
- Streckeisen, A. 1978: Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks: Recommendations and suggestions of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 7: 331-335.
- Tagle, D. y Alt, J. 2004: Hydrothermal Alteration of Basalts beneath the Bent Hill Massive Sulfide Deposit, Middle Valley, Juan de Fuca Ridge. *Economic Geology*, 99(3): 561-584.
- Torres-Zafra, J. L.; Lavaut-Copa, W. y Cazañas-Díaz, X. 2017: *Modelos descriptivos-genéticos de depósitos minerales metálicos para el Mapa Metalogénico a escala 1:250 000 de la República de Cuba*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología. 267 p.
- Volodin, R. N. y Stepanov, V. M. 1967: *Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda-revisión para el cobre, realizado en la parte oriental de la provincia de Pinar del Río*. Pinar del Río: CNFG.

Recibido: 22/04/2019

Aceptado: 24/05/2019