

PETROGRAFÍA, GEOQUÍMICA Y DATACIÓN U-PB EN ZIRCONES DE DOMOS RIODACITICOS ENCAJANTES DEL DEPÓSITO ROMERO E IMPLICACIONES METALOGENÉTICAS

Albert Joan Belén Manzueta

Resumen

Este trabajo se centró en la caracterización petrológica y la datación de los domos riodacíticos que se encuentran en la serie encajante del depósito de Romero. El hallazgo del depósito Romero evidencia la existencia de depósitos minerales tipo VMS en la Formación Tireo, el cual puede ser tomado como referencia a lo hora de realizar exploraciones en dicha formación geológica. Debido a que la Formación Tireo presenta una variada asociación magmática, esta Formación es un elemento vital para entender las fuentes de los magmas y los procesos petrogenéticos en la zona de subducción en el arco de Isla Caribeño durante el Cretácico. Dentro de los resultados encontrados en esta investigación se demostró que: En la Formación Tireo se han descrito diferentes litologías que gradúan de composiciones félsicas a máficas. La mayor parte de estas rocas han sufrido diferentes procesos de alteraciones las cuales se pudieron evidenciar mediante los estudios petrográficos y geoquímicos. Tomando en consideración los resultados de las dataciones muestran que la mayor parte de las poblaciones de zircones analizados no se corresponden

con los inicios de formación del arco de isla caribeño, por lo que son considerados heredados y solamente una población de zircones arrojó una edad que podría ser la edad de cristalización de las rocas (115.8 ± 10 Ma). Parte de las rocas de la Formación Tireo pudieron haberse formado durante el nacimiento del arco de isla caribeño, por lo que es probable que el depósito xiv Romero, ya descrito como tipo (VMS), sea equivalente temporal a depósitos alojados en el primitivo arco-isla (principalmente la Formación Maimón).

Palabras Claves: Formación Tireo, petrológica, datación de los domos riódacíticos, formación geológica, subducción, Cretácico, zircones, litologías, composiciones félsicas a máficas, volcaniclasticas, mineralización, cristalización de las rocas, asociación magmática, medición elemental o isotópica .

ABSTRACT:

This work focused on the petrographic characterization and dating of the rhodacitic domes that are in the encaustic series of the deposit of Romero. The finding of the Romero deposit evidences the existence of VMS mineral deposits in the Tireo Formation, which can be taken as reference when performing explorations in this geological formation. Because the Tireo Formation presents a varied magmatic association, this Formation is a vital element to understand the sources of the magmas and petrogenetic processes in the zone of subduction in the arc of Caribbean Island during the Cretaceous. Among the results found in this research it was demonstrated that: In the Tireo Formation, different lithologies have been described that graduate from felsic to mafic compositions. Most of these rocks have undergone different processes of alterations that

could be evidenced by the petrographic and geochemical studies. Taking into consideration the results of the dating shows that the majority of the populations of zircons analyzed do not correspond to the beginnings of formation of the arch of Caribbean island, reason why they are considered inherited and only a population of zircons showed an age that could be the age of crystallization of the rocks (115.8 ± 10 Ma). Some of the rocks of the Tireo Formation may have formed during the birth of the arch of the Caribbean island, so it is probable that the deposit xiv Romero, already described as type (VMS), is temporary equivalent to deposit housed in the primitive arch- Island (mainly the Maimón Formation).

Keywords: Formation Tireo, petrological, dating of the domes riodacíticos, geological formation, subduction, Cretaceous, zircons, lithologies, felsic to mafic compositions, volcanoclastics, mineralization, crystallization of rocks, magmatic association, elemental or isotopic measurement.

Introducción

El estudio propuesto estuvo centrado en la caracterización petrológica y datación mediante U/Pb en zircón de las riodacitas y andesitas de la serie encajante de la mineralización metálica del depósito Romero (Distrito Las Tres Palmas, San Juan, República Dominicana) así como su correlación espacial y temporal con ésta. La consecución de este proyecto supondría un avance muy significativo en el entendimiento de la metalogenia asociada a magmatismo de arcos-islas intraoceánicos, muy especialmente para las unidades volcánicas y volcanoclásticas del Cretácico Superior de

las Antillas Mayores en general y de Hispaniola (mayormente agrupadas en el Grupo Tireo) en particular; subordinadamente, el constreñimiento de edades de los cuerpos intrusivos y extrusivos de la Formación Tireo en la Cordillera Central Dominicana busca complementar el conocimiento actual sobre la evolución del magmatismo del arco-isla, respondiendo algunas cuestiones polémicas todavía no bien resueltas por el mundo académico.

De gran importancia también es su potencial uso como herramienta de prospección para depósitos metálicos en la región, mejorando las posibilidades de éxito de las mismas y por tanto suponiendo un impacto positivo directo en la economía del país. Existen varios trabajos relacionados con el tema de dataciones y caracterizaciones tanto petrográficas como petrológicas en la Cordillera Central, pero para los fines de esta investigación solo se toman aquellos que se consideran con mayor relevancia y que le darán peso a la investigación, atendiendo principalmente a su calidad y pertinencia.

Dataciones radiométricas de mineralizaciones y alteraciones hidrotermales han sido realizadas para el depósito de Pueblo Viejo. Kesler et al (1981) apuntaba una edad de la mineralización de entre 130 y 110 Ma en base a la similitud de los ratios de los isótopos de Pb de la galena, la enargita y la pirita con los de las rocas encajantes de la Formación Los Ranchos. Arribas et al. (2011) reportó edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de alunitas comprendiendo un rango de 40 Ma (de 80 Ma a 40 Ma) concluyendo que esto era el resultado de una historia termal compleja de la región de Pueblo Viejo. Mueller et al. (2008) explicó años antes esta misma observación y la

atribuyó al enterramiento del distrito bajo la peridotita de Loma Caribe durante la obducción de esta en el Cretácico superior.

La datación de un dique andesítico inter-mineral (coetáneo con la mineralización; Nelson, 2000) por Kessler et al. (2005b) reportó una edad de U/Pb de 109.6 ± 0.6 Ma. Kirk et al. (2014) recientemente publicó edades de mineralización de isócrona de Re/Os de 111.9 ± 3.7 Ma a partir de concentrados de pirita. Pero más recientemente Nelson et al., 2015 publicó edades de mineralización del distrito Pueblo Viejo mediante la datación Re-Os en molibdenita de unos 111.5 ± 0.4 Ma, lo cual apunta a una edad de mineralización del Distrito Pueblo Viejo en el Cretácico inferior.

Los primeros modelos que tuvieron en cuenta la tectónica de placas en esta área fueron publicados en los años 1970-80 (Bracey and Vogt, 1970; Malfait y Dinkelman, 1972; Iturralde-Vinent, 1975; Ladd, 1976; Mattson, 1979; Maurrasse, 1981; Walper, 1982; Pindell and Dewey, 1982). Los datos y las ideas de estos trabajos fueron recopilados, complementados y discutidos en artículos posteriores tales como Draper y Lewis (1989), Donnelly et al., (1990), Lewis y Draper (1991) y Pindell y Barrett (1990).

Estos autores sugirieron una subducción temprana de la Placa del Caribe por debajo de la Placa Norteamericana, formando las Proto-Antillas Mayores. La complejidad de la geología, particularmente en la parte central de la Isla la Española, sugirió que el modelo de un único arco podía ser demasiado simplificado para los estadios iniciales y que la evolución temprana pudo involucrar sutura de dos arcos: un proto-arco de las Antillas Mayores del Cretácico Inferior formado

por subducción desde el sur y una inversión de polaridad posterior durante el Cretácico Superior (Kerr et al., 1999 y sus referencias).

La Formación Tireo se encuentra bordeada por dos sistemas o zonas de cizalla de primer orden: la zona de falla de la Hispaniola y la Zona de falla San Juan-Restauración (Lewis et al., 1991; Escuder Viruete et al., 2008). (Ver anexo, Fig. 1). El Proyecto Romero se encuentra en la Provincia de San Juan, República Dominicana, en las Antillas Mayores del Mar Caribe, a unos 165 km al Noroeste de la ciudad capital de Santo Domingo.

Las mineralizaciones del Proyecto Romero se localizan en el lado Sur de la Cordillera Central, en la Formación Tireo, mayormente de edad Cretácico Superior. La Formación Tireo tiene una extensión de 290 km de largo y un espesor promedio de 3 km, donde podemos encontrar una secuencia de rocas volcánicas, sub-volcánicas y volcano-sedimentarias relacionadas con el arco de isla (Lewis et al., 1991).

Metodología

Este aspecto contiene las informaciones del diseño, tipo de estudio, la instrumentación y los componentes básicos del procedimiento metodológico utilizado en la investigación titulada: Petrografía, geoquímica y datación U-Pb en zircones de domos riódacíticos encajantes del depósito de Romero (Distrito Las Tres Palmas, San Juan, República Dominicana): implicaciones metalogenéticas.

Diseño de investigación

En el desarrollo de esta investigación no se manipularon variables independientes para observar sus efectos sobre variables dependientes en una situación de control, por lo que la investigación es de diseño no experimental (Hernández, et al., 2010). El tipo de investigación que se utilizó es exploratorio, debido a que en el área de estudio no existen datos preexistentes sobre dataciones de los domos riodacíticos encajantes en el depósito Romero. Para cumplir con los objetivos de esta investigación las variables fueron medidas y descritas en función de las características geológicas, petrológicas, texturales y 29 mineralógicas presentes en los afloramientos rocosos así como también en el análisis de los sondeos brindados por la Compañía Goldquest; por este motivo el enfoque apropiado para obtener la correcta interpretación y recolección de los datos es el enfoque mixto.

Taylor y Bogdan (1987), se refieren al enfoque cualitativo como un modo de encarar el mundo empírico, señalan que en su más amplio sentido es la investigación que produce datos descriptivos. El enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar hipótesis con base en la mediación numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento en las mismas (Hernández et al., 2003). De acuerdo a las conceptualizaciones mostradas por los autores anteriormente mostrados el enfoque de esta investigación es mixto.

Métodos

En el presente trabajo se aplicó el método deductivo, ya que el método deductivo crea teorías a partir de la observación de los hechos, mediante la generalización del comportamiento observado; donde se desarrolla una especie de generalización, sin que por medio de la lógica pueda conseguir una demostración de las citadas teorías o conjunto de conclusiones (Behar, 2008).

Se seleccionó el método de investigación deductivo debido a lo planteado por Behar en el 2008, porque en este proyecto de investigación se estudiarán a detalle los procesos de Formación del depósito Romero mediante los rasgos geológicos, geoquímicos y 30 correlacionales del mismo, es decir analizando los elementos de la formación para llegar a un concepto o teoría siguiendo un proceso analítico.

Metodología analítica

Las técnicas e instrumentos utilizados en la investigación fueron: equipos de campo tales como, piqueta, GPS, brújula, escalímetro, lupa, rayador, fotografías satelitales, software informático aplicado a la geología para la creación de mapas geológicos (mapinfo). Las técnicas analíticas geoquímicas que se desarrollaron, son las siguientes:

Fase I, estudio mineralógico y textural mediante microscopía óptica de luz transmitida y reflejada y microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM-EDS) a partir de secciones delgadas pulidas.

Estudio de la geoquímica mineral mediante microsonda electrónica (EMPA). Estudio de la geoquímica de roca total mediante fluorescencia de Rayos X (XRF) para elementos mayores y Zr e ICP-MS para elementos traza.

Fase II

Procesamiento para concentración de zircones: trituración y molienda de la roca. Tamizaje por debajo de 125 μm y separación de fracciones de <50 μm , 50-75 μm y 75-100 μm . Separación magnética mediante uso del separador electromagnético Frantz en diversas fracciones a campos magnéticos crecientes. Concentración con hidroseparador de las fracciones no magnéticas para la obtención de concentrados de minerales pesados no 31 magnéticos. Disolución/digestión mediante un combinado de ácidos de silicatos, carbonatos y demás fases para la obtención de concentrado final de zircones. Identificación y caracterización morfológica de los zircones mediante microscopía electrónica de barrido con analizador de energía (SEM-EDS).

Fase III

Caracterización textural de zonaciones químicas e inclusiones minerales en los cristales de zircón mediante estudios con electrones retrodispersados (SEM-BSE-EDS) y catodoluminiscencia. Datación radiométrica absoluta mediante U/Pb.

Muestras de estudio

Fuente		UTM	Fm	Descripción	
En el cuadro 1 (ver anexos), se presentan las muestras a las cuales se les realizaron los estudios de laboratorio, estas fueron anteriormente tomadas en campo y son las que se llevaron hacia Barcelona para su posterior análisis. Muestra					
E		N			
Imperial-1	Afloramiento	260112	2110117	Tireo	Feldspar porphyry (felds-hornblende-sporadic quartz eye phenocrysts)
Imperial-2	Afloramiento	258402	2112190	Tireo	Feldspar porphyry (~Equigranular texture (felds-hornblende-sporadic quartz eye))
Romero-1	Sondeo	258587	2116026	Tireo	LTP-110 (162.51 - 167.01 mts)
Romero-2	Sondeo	258587	2116026	Tireo	LTP-110 (287.25 - 291.73 mts)
Romero-3	Sondeo	258520	2115942	Tireo	LTP-113 (537.33 - 541.74 mts) / Lower andesite
Rhyolite (Romero)	Afloramiento	258953	2115793	Tireo	Feldspar - Qtz porphyritic, flow banding; some disseminated magnetite

Estas muestras fueron tomadas tanto de afloramientos de rocas, como de sondeos que fueron recuperados por la compañía minera Goldquest y que fueron brindadas para fines de este estudio. En ella se resalta dónde se tomaron, así como también sus coordenadas geográficas y una pequeña descripción macroscópica de sus componentes minerales, texturales y estructurales. Estas muestras se encuentran distribuidas en el mapa de la fig 2 (ver anexos), el cual fue realizado utilizando como base la hoja geológica de Arroyo Limón cuadrante 5973-III. Las muestras fueron tomadas en Tiro superior en donde predominan mayormente rocas riódacíticas y andesíticas de composición ácidas a intermedias.

TÉCNICAS

Microscopía óptica de luz transmitida y reflejada

Las muestras se cortaron en secciones con el fin de elegir las más representativas, de acuerdo con el contenido mineralógico y textural. A partir de esta selección inicial, las secciones delgadas pulidas se realizaron en el “Servei de Lamina Prima” de la Universidad de Barcelona.

Las Secciones delgadas fueron utilizadas para estudios texturales y mineralógicos utilizando un microscopio óptico con luz transmitida (minerales transparentes) y luz reflejada (principalmente, minerales opacos). Se seleccionaron especímenes interesantes y representativos para su posterior análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM). (Ver anexos, figura 3).

Microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM-EDS)

El estudio con SEM-EDS se llevó a cabo usando un equipo Quanta 200 FEI, XTE 325/D8395 equipado con un sistema de microanálisis de dispersión de energías INCA Energy 250 operando a 20kV y una corriente de haz de 1nA en los Serveis Científics i Tecnològics de la Universidad de Barcelona. (Ver anexos, figura 4).

Estudio de la geoquímica mineral mediante microsonda electrónica (EMP).

Composiciones químicas minerales se obtuvieron utilizando una microsonda de electrones con longitud de onda de la espectrometría dispersiva (EPMA-WDS). Los análisis se obtuvieron en el "Serveis Científics i Tecnològics" (Universidad de Barcelona), utilizando una microsonda de cuatro canales Cameca SX50 electrones (EMP) con longitud de onda de la espectrometría dispersiva (WDS). Los análisis se realizó en el voltaje de aceleración de 20 kV, 20 de corriente del haz nA, diámetro del haz 2 micras y contar el tiempo de 10 segundos por elemento. La rutina a utilizada para el análisis de haluros será 15 kV y 6 nA. Normas y líneas utilizadas para los análisis fueron: dióxido (SiK α), rutilo (TiK α), Al₂O₃ sintético (AlK α), pirita (FeK α), rhodonite (MnK α), periclase (MgK α), albita (NaK α), wollastonita (CaK α), ortoclase (KK α), blenda (ZnK α), fluorita (FK α) y AgCl (ClK α). (Ver anexos, figura 5).

Estudio de la geoquímica de roca total mediante fluorescencia de rayos X (XRF) e ICP-MS.

Las muestras fueron analizadas para geoquímica de roca total. Estas fueron pulverizadas en un molino de anillos de carburo de tungsteno previa separación de vetas hidrotermales. Las concentraciones de los elementos mayores y el Zr se determinaron en perlas de fusión a partir de ~0.6 g de muestra pulverizada diluida en 6 g de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ mediante un equipo de fluorescencia de rayos X Philips Magix Pro (PW-2440) en el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada (CIC-UGR). La precisión es mejor de $\pm 1.5\%$ relativo para concentraciones del orden de 10% en peso; la precisión en la medición de la concentración de Zr es mejor de $\pm 4\%$ relativo para concentraciones de 100 ppm.

Los elementos trazas fueron determinados en el CIC-UGR por medio de espectrometría ICP-MS tras una digestión ácida con $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ de ~100 mg de muestra pulverizada en bombas de Teflón a ~180°C y 200psi durante 30 minutos, evaporación y secado y posterior disolución en 100 ml de HNO_3 al 4%; la precisión es mejor de $\pm 2\%$ y $\pm 5\%$ relativo para concentraciones de 50 y 5 ppm, respectivamente.

Datación U/Pb en zircones

Separación de zircones

Una vez seleccionadas las muestras óptimas para datación, se comenzó al procesamiento para concentración de zircones: grandes cantidades de muestra (>4kg) se trituraron y molieron. Posteriormente fueron tamizadas por debajo de 125 μm y se separaron frac-

ciones de $<53 \mu\text{m}$, $53\text{-}75 \mu\text{m}$ y $75\text{-}125 \mu\text{m}$. A continuación se comenzó con la separación magnética mediante uso del separador electromagnético Frantz en 35 diversas fracciones a campos magnéticos crecientes y a la concentración con hidroseparador de las fracciones no magnéticas para la obtención de concentrados de minerales pesados no magnéticos.

Finalmente, se llevaron a cabo la disolución/digestión mediante un combinado de ácidos de silicatos, carbonatos y demás fases para la obtención de concentrado final de zircones. Con el concentrado de zircones se procedió a la identificación y caracterización morfológica de los cristales mediante microscopía electrónica de barrido con analizador de energía (SEM- EDS). Las zonaciones químicas e inclusiones minerales en los cristales de zircón se realizaron mediante estudios con electrones retrodispersados (SEM-BSE-EDS) y catodoluminiscencia. El proceso se muestra en más detalle a continuación: Se procesaron un total de 5 muestras rocosas obtenidas en las visitas de campo previas a la realización de esta investigación. Estas muestras fueron tomadas teniendo un cuidado riguroso para evitar la contaminación de las mismas. El procesamiento se desarrolló en los laboratorios de la Universidad de Barcelona. El proceso a seguir básicamente incluye:

- 1- Trituración de las muestras de un diámetro de 30-40cm en trituradoras de mandíbula de tamaños de quijada decrecientes.
- 2- Molienda de las muestras en un molino de anillas Retsch de acero.
- 3- Tamizado en húmedo con torre de tamices de malla $125\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $75\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ y $30\mu\text{m}$. Secado en estufa a 50°C .

- 4- Separación magnética usando un separador electromagnético Frantz. Se aplicaron voltajes crecientes de 3.5V, 23.9V, 34.1V y 106.6V.
- 5- Concentración de minerales densos a partir del concentrado no magnético mediante hidroseparación (HS11).
- 6- Disolución/digestión, mediante un combinado de ácidos, de silicatos, carbonatos y demás fases para la obtención de concentrado final de zircones.
- 7- Separado manual (*handpicking*) de los zircones mediante lupa binocular.
- 8- Caracterización textural de zonaciones químicas e inclusiones minerales en los cristales de zircón mediante estudios con electrones retrodispersados (SEM-BSE-EDS) y catodoluminiscencia.

Datación U/Pb de zircones

La datación U-Pb en los zircones recuperados de las muestras se realizó utilizando la técnica de ablación láser. La ventaja de ésta técnica es su alta precisión y rapidez en la medición elemental o isotópica .

Análisis de datos

El análisis de los datos geoquímicos en este caso se realizó mediante softwares especializados comúnmente usados por muchas de las compañías mineras y universidades. La realización de los trabajos analíticos se realizó en los laboratorios de la Universidad de Barcelona y Granada desde el 25 de enero del 2016 y culminó el 27 de marzo del mismo año. En estas fe-

chas se efectuó el viaje del sustentante a los centros de estudios superiores ya mencionados para el análisis de las muestras, por lo que, durante el desarrollo de los análisis de las muestras se procedió directamente a la realización de los trabajos para la entrega de tesis. La interpretación de cada una de las muestras representadas en gráficas, tablas y diagramas, se desarrollaron mediante reuniones de los miembros que conforman la investigación (sustentante y asesor) en donde se presentaron, evaluaron y discutieron los resultados preliminares.

Análisis de los Resultados

Como se puede observar la mayor parte de las edades son anteriores a las propuestas por Escuder-Viruet et al. (2007b) para el inicio de depositación de la secuencia basal de la Formación Tireo hace unos 90 Ma (Aptiense- Turoniense, i.e. ca. 120-90 Ma). Inclusive muchas de estas edades son anteriores al inicio de la subducción en el Caribe hace unos 135 Ma (es decir, en el Neocomiense; Rojas-Agramonte et al., 2011). Como se observa 5 de las poblaciones de zircones analizados denotan edades anteriores al inicio de subducción, por lo que serán considerados en adelante como heredados (es decir, no se corresponden con la edad de cristalización magmática de las rocas volcánicas que las encajan). Tomando en consideración la muestra Romero 1 (Grupo 2), si se obtienen edades de cristalización magmática de la roca (115.8 ± 10 Ma) ubicándola en el Cretácico Inferior.

Zircones heredados en las Antillas Mayores

El zircón es un mineral accesorio, común en rocas continentales, que puede retener información geoquímica primaria, soportando ambientes de meteorización, transporte sedimentario, y metamorfismo de alto grado (Proenza et al., 2014). El zircón es un mineral que puede soportar grandes temperaturas antes de llegar a su punto de fusión y puede sobrevivir como un mineral heredado en rocas ígneas. Anteriormente se han publicado varios artículos sobre zircones heredados en el área de Caribe (Proenza et al. 2014; Rojas-Agramonte et al., 2016), en los cuales se han encontrado zircones en los cuerpos ofiolíticos en Cuba con edades muy anteriores a los inicios de la subducción en el Caribe e incluso anteriores a la formación del arco de isla Caribeño.

En estos trabajos se han datado zircones heredados recuperados de cuerpos graníticos de ~536–268 Ma, los cuales son interpretados como sedimentos que fueron envueltos y subducidos conteniendo zircones preexistentes y que posteriormente dieron lugar a esos cuerpos graníticos (Rojas-Agramonte et al., 2016). Estas edades propuestas anteriormente engloban las edades de zircones heredados encontradas en la Formación Tireo. Análisis de dataciones U-Pb realizadas a 4 zircones del depósito de cromititas La Mercedita en Cuba (Proenza et al., 2014), arrojaron edades bordeando el Carbonífero-Permiano (289 ± 9 Ma to 310 ± 10 Ma) las cuales coinciden con gran parte de los zircones heredados encontrados en esta investigación.

Como se puede constatar, tanto las dataciones realizadas en los depósitos ofiolíticos en Cuba como los resultados de las dataciones recientemente realizadas

en la Formación Tireo, tienen una cierta relación con las edades que arrojan los zircones, por lo que se puede inferir que la procedencia de los zircones que dieron origen a las anfibolitas del Este de Cuba, son los mismos en comparación con los zircones heredados de la Formación Tireo, los cuales pudieron ser originados por la subducción de sedimentos preexistentes conteniendo zircones y posterior fusión parcial de estos sedimentos en la zona de supra-subducción dando origen a nuevas rocas volcánicas y volcanosedimentarias.

Cristalización magmática de las rocas encajantes de mineralizaciones VMS en Tireo

Se han realizado varios trabajos sobre el quimismo y geocronología de las rocas de la Formación Tireo. Las primeras edades sobre estas rocas fueron propuestas por Lewis et al. (1991), quienes asignan una edad en base a microfósiles para la secuencia volcánica inferior de 112–99 Ma (es decir, Cretácico inferior). En este mismo trabajo se realizaron dataciones para las secuencias volcánicas superiores, asignando una edad de 81.2 ± 8.2 Ma (es decir, Cretácico superior).

Más recientemente, Escuder-Viruete et al. (2007b) establecieron a partir de análisis fosilíferos y de isótopos radiométricos (U/Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) que la secuencia basal de la Formación Tireo, de afinidad toleítica, empezó a depositarse antes de aproximadamente unos 90 Ma (Aptiense- Turoniense, i.e. ca. 120-90 Ma). Estos autores también consideran que la secuencia volcánica superior, compuesta mayormente por adakititas, andesitas ricas en Mg y basaltos enriquecidos en Nb empezaría a depositarse en el límite Turoniense-Coniaciense (ca. 90 Ma) y continuaría hasta el Campaniense (ca. 83

to 71 Ma). Tomando en consideración la segunda población de zircones de la muestra ROMERO 1 (115.8 ± 10 Ma), se puede observar que coincide con las edades de depositación de la secuencia basal de la Formación Tireo propuesta por Escuder-Viruete et al. (2007b).

En la Formación Los Ranchos se han realizado dataciones tanto de las mineralizaciones como de las rocas que las encajan. Recientemente Nelson et al. (2015) publicó edades de mineralización del distrito Pueblo Viejo mediante la datación Re-Os en molibdenita de unos 111.5 ± 0.4 Ma, lo cual apunta a una edad de mineralización 65 del Distrito Pueblo Viejo en el Cretácico inferior. Esta edad indicaría que las mineralizaciones serían coetáneas al volcanismo que originó las rocas que las encajan (Formación Los Ranchos), demostrándose que magmas de afinidad toleítica también pueden originar depósitos epitermales de clase mundial (Escuder-Viruete et al., 2006).

La Formación Maimón, la cual se caracteriza por alojar diversos cuerpos de sulfuros masivos volcano-génicos (VMS) de entre los que destaca el depósito actualmente en explotación de Cerro de Maimón. Esta formación geológica representa una de las unidades más primitivas dentro del arco-isla Circum-Caribeño (Lewis and Draper, 1991), pero hasta la fecha nunca han sido datadas las rocas de esta Formación aunque. No obstante se estima que esta se formó durante el nacimiento del arco de isla Caribeño hace unos (~ 125 Ma; Torró et al., 2016).

Las rocas de la Formación Tireo se formaron en un contexto de arco de isla intraoceánico. Estas rocas de la Formación Tireo parecen haberse formado durante el nacimiento del arco de isla caribeño, por lo que es

probable que el depósito Romero ya descrito como tipo (VMS) podría ser equivalentes temporales a depósitos VMS encajados en la Formación Maimón y se formara en condiciones de ante arco asociados al inicio del arco de isla Caribeño.

Conclusiones

En la Formación Tireo se han descrito diferentes litologías que gradúan de composiciones félsicas a máficas. La mayor parte de estas rocas han sufrido diferentes procesos de alteraciones las cuales se pudieron evidenciar mediante los estudios petrográficos y geoquímicos.

Tomando en consideración los resultados de las dataciones U/Pb, la mayor parte de las poblaciones de zircones analizados son considerados heredados y solamente una población de zircones arroja una edad que podría ser la edad de cristalización de las rocas (115.8 ± 10 Ma).

Las rocas de la Formación Tireo parecen haberse formado durante el nacimiento del arco de isla caribeño, por lo que es probable que el depósito Romero ya descrito como tipo (VMS) podría ser equivalente a depósitos VMS alojados en la Formación Maimón.

Referencias

- Amarante, J. A., Jimenez, J., and, J. F., (1989), Geology, hydrothermal alteration, and geochemistry of epithermal Au-Ag mineralisation in the Restauracion área, Dominican Republic, in Barker, L., ed., Transactions of the 11th Caribbean Geologi-

- cal Conference, Barbados, 1986: St. Michael, Barbados, Energy and Natural Resources Division, p. 1-15, 26.
- Arribas, A., Arribas, I., Draper, G., Hall, C., Kesler, S.E., McEwan, C., Muntean, J.L., (2011): 40Ar/39Ar dating of alunite from the Pueblo Viejo Gold-Silver District, Dominican Republic. *Economic Geology* 106, 1059-1070.
- Behar D., (2008): *Introducción a la Metodología de la Investigación*, Editorial Shalom. P.40.
- Bienvenu, P., Bougault, H., Joron, J.L., Treuil, M., Demitriev, L., (1990). REE/non REE element hygromagmaphile element fractionation. *Chemical Geology* 82, 1-14.
- Bracey, D.R., and Vogt, P.R., (1970): Plate tectonics in the Hispaniola area. *Geological Society of America Bulletin* 81, 2855 – 2860.
- Castro, A., (2015): *petrografía de rocas ígneas y metamórficas*, primera edición, ediciones digitales, P. 21-202.
- Chelle-Michou, C., Chiaradia, M., Ovtcharova, M., Ulianov, A., Wotzlaw, J.F., (2014): Zircon petrochronology reveals the temporal link between porphyry systems and the magmatic evolution of their hidden plutonic roots (the Eocene Corocochuayco deposit, Peru). *Lithos* 198, 129-140.
- Chiaradia, M., Merino, D., Spikings, R., (2009): Rapid transition to long lived deep Crustalmagmatic maturation and the formation of giant porphyry-related mineralization (Yanacocha, Peru): *Earth and Planetary Science Letters* 288, 505-515.
- Dana, E. S., and C. S. Hurlbut, (1962). “*Manual de Mineralogía*”. Ed. Reverté, Barcelona.

- Defant, M.J., and Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arcmagmas by melting of young subducted lithosphere: *Nature*, v. 347, p.662–665.
- Donnelly, T.W., (1994) The Caribbean sea floor. In: Donovan, S.K., and Jackson, T.A. (eds.), *Caribbean Geology: An Introduction*. U.W.I. Publ Assoc, Kingston, p. 41 – 64.
- Donnelly, T.W.; Beets, D.; Carr, M.J.; Jackson, T.; Klaver, G.; Lewis, J.; Maury, R.; Schellenkens, H.; Smith, A.L.; Wadge, G., and Westercamp, D., (1990) History and tectonic setting of Caribbean magmatism. In: Dengo, G., Case, J. (eds.), *The Caribbean Region. Vol. H. The Geology of North America*. Geological Society of America, 339 – 374.
- Draper, G., and Lewis, J.F., (1989): Petrology and structural development of the Duarte complex, central Dominican Republic: A preliminary account and some tectonic implications. In: *Transactions, 11th Caribbean Geological Conference*, Cartagena, Colombia, 1983, p. 103 – 112 edición, McGraw Hill, p. 188.
- Escuder-Viruete, J., Díaz de Neira, A., Hernáiz Huerta, P.P., Monthel, J., García Senz, J., Joubert, M., Lopera, E., Ullrich, T., Friedman, R., Mortensen, J., Pérez-Estaún, A., (2006). Magmatic relationships and ages of Caribbean island-arc tholeiites, boninites and related felsic rocks, Dominican Republic. *Lithos*, 90, 161-186.
- Espaillet, J., (2013): Potencial mineral de la Formación Tireo, República Dominicana.
- Programa de resúmenes y ponencias del 2º Congreso Dominicano de Geología, p. 44.

- Farré de Pablo, J., (2014): Petrology and geochemistry of the Maimón Formation (Dominican Republic): geodynamic and metalogenetic implications. Tesis de Final de Grado, Universitat de Barcelona, Barcelona, 177pp.
- Foster M.D. (1962) Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. Geol. Surv. Prof. Pap. 414-A.
- Franz G, Liebscher A (2004) Physical and chemical properties of the epidote minerals—an introduction. Rev Mineral Geochem 56:1-82.
- Garritz R., Andoni; Gasque S., Laura; Martínez V., Ana Química Universitaria, 1ª edición; Pearson Prentice-Hall: México, 2005; p. 162-165.
- Groves, D.I., Vielreicher, R.M., Goldfarb, R.J. & Condie, K.C. 2005b. Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time. In: McDonald, I., 70
- Noyce, A.J., Butler, I.B., Herrington, R.J. & Polya, D.A. (eds) Mineral Deposits and Earth Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 248, 71–101.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. & Mitchell, S. F. (2007). Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th Co discrimination diagram. Journal of Petrology 48, 2341–2357.
- Iturralde Vinent, (1975): Problems in the application of modern tectonic hypotheses to Cuba and the Caribbean region. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 59, 838– 855.
- Kerr, A.C., Iturralde Vinent, M.A., Saunders, A.D., Babbs, T.L., Tarney, J., 1(999): A new plate tectonic model of the Caribbean: Implications from a

- geochemical reconnaissance of Cuban Mesozoic volcanic rocks. Geological Society of America Bulletin, 111, 1581 – 1599.
- Kesler, S.E., Campbell, I.H., Smith, C.N., Hall, C.M., Allen, C.M. (2005b): Age of the Pueblo Viejo Gold-Silver Deposit and Its Significance to Models for High-Sulfidation Epithermal Mineralization. *Economic Geology* 100, 253-272.
- Kirk, J.D., Ruíz, J., Kesler, S.E., Simon, A., Muntean, and J.L., (2014) Re-Os age of the Pueblo Viejo epithermal deposit, Dominican Republic. *Economic Geology* 109, 503-512.
- Leterrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., and Maréchal, M. (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 59, 139-54.
- Lewis, J.F., and Draper, G., (1991): Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. In: Dengo, G., and Case J.E., eds, *The Caribbean region: Boulder, Colorado*, Geological Society of America, *The Geology of North America H*, 77 – 140.
- Losert, J., (1973). Genesis of copper mineralization and associated alterations in the Jurassic volcanics rocks of Buena Esperanza mining area. *Publicación N°40*, Depto. de Geología, Univ. De Chile, Santiago, 104 p.
- Marchesi, C.; Garrido, C.J.; Bosch, D.; Proenza, J.A.; Gervilla, F.; Monié, P., and Rodríguez-Vega, A., (2007) Geochemistry of Cretaceous Magmatism in Eastern Cuba: Recycling of North America continental sediments and implications for subduction polarity in the Greater Antilles Paleo-arc. *Journal of Petrology*, v. 48, p. 1813 – 1840

- Mattson, P.H., (1979): Subduction, buoyant braking, flipping and strike-slip faulting in the northern Caribbean. *Journal of Geology* 87, 293 – 304.
- Maurrasse, (1981): Relations between the geologic setting of Hispaniola and the evolution of the Caribbean. In: *Transactions de 1er colloque sur la Géologie d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti, Le Natal, S.A.*, 245 – 264.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Gali, S., & Llovet, X., (2010). Técnicas de Caracterización mineral y su implicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Nelson, C.E., Stein, H., Dominguez, H., Carrasco, C., Barrie, T., Torró, L., and Proenza, J., (2015): Re-Os dating of molybdenite from the Pueblo Viejo Au-Ag-Cu and Douvray Cu-Au districts, Hispaniola. *Economic Geology*, v. 110, pp. 1101–1110.
- Pearce, J.A. (1983). The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. En: Hawkesworth, C.J., Norry M.J. (Eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich, Shiva, 230-249.
- Peccerillo, A. & Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63–81.
- Pérez, O., Ortega, C., Solari, L. A., & Gómez, A., (2010). Aplicaciones del sistema LA-ICPMS del centro de geociencias de la UNAM. *Simposio de Metalurgia*.
- Piercey, S.J., (2009): Lithogeochemistry of volcanic rocks associated with volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits and applications to exploration.

- In: Cousens, B.L., Piercey S.J. (eds) Subaqueous volcanism and mineralization. Mineral Deposits Division-Volcanology and Igneous Petrology Division, Geological Association of Canada, Short Course Notes 19, p. 15 – 40.
- Rollinson H.R., (1992), another look at the constant sum problem in geochemistry. *Mineral mag.* 56, 469-475.
- Román-Alday MC, Torró L, Proenza JA, Melgarejo JC, Romero J, Amarante A, Espaillet J, Nelson C (2015) The Romero Cu-Au-Zn deposits, Cordillera Central, Dominican Republic: Preliminary data on the mineralogy and geochemistry of mineralization.
- Mineral resources in a sustainable world; Proceedings 13th SGA Biennial Meeting, 5, 2087-2090.
- Shervais, J.W., (1982): Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters* 59: p. 101 – 118
- Sillitoe, R.H., Hannington, M.D. and Thompson, J.F., (1996). High sulfidation deposits in the volcanogenic massive sulfide environment. *Economic Geology*, V. 91, pp. 204-212.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magma-tism in the ocean basins*. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.
- Tarbuck, E y F. Lutges. (1999). “ciencias de la tierra” una introducción a la geología física. Ediciones Prentice Hall, Madrid.
- Taylor, S y Bogdan, R., (1987): Introducción a los métodos cualitativos, Primera edición, Ediciones Paidós, P. 7.

- Toscano, M., Pascual, E., Nesbitt, R.W., Almodóvar, G.R., Sáez, R., Donaire, T., (2013): Geochemical discrimination of hydrothermal and igneous zircon in the Iberian Pyrite Belt, Spain. *Ore Geology Reviews* 56, 301-311.
- Vassallo, L.F. (2008) "Yacimientos Minerales Metálicos" 4ª edición. Versión OnLine, Bol-e. Centro de Geociencias, UNAM. Querétaro, México Velilla, N., & Jimenez, J., (2004). "Óptica mineral": una herramienta Informática para el estudio de los minerales en el microscopio. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 57-61.
- Von Quadt, A., Erni, M., Martinek, K., Moll, M., Peytcheva, and Heinrich, C.A., (2011): Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatic-hydrothermal systems.
- Walper, J.L., (1982): Geologic evolution of the Greater Antilles. In: *Transactions, 9th Caribbean Geological Conference*, Santo Domingo, Dominican Republic, 1980, 13 – 21.
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A., (1977): Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, p. 325 – 343.
- Winter, J.D. (2010): *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Prentice hall, New York.