

PERSPECTIVAS PARA METALES BASE Y PRECIOSOS EN EL ARCO VOLCÁNICO CRETÁCICO DE CUBA CENTRAL

JORGE LUIS TORRES ZAFRA

Instituto de Geología y Paleontología,

Vía Blanca No. 1002 e/ Carretera Central y Línea de Ferrocarril, Virgen del Camino, San Miguel del Padrón, La Habana. Cuba.

Correo: zafra@igp.minbas.cu

RESUMEN

Teniendo en cuenta conclusiones de investigaciones anteriores de otros autores y la interpretación de la información geológica, geoquímica y geofísica disponible, se realizó la evaluación del potencial de recursos minerales de metales base y preciosos del Arco Volcánico Cretácico de las Antillas Mayores en Cuba Central. Se estableció que las principales unidades portadoras de mineralización son las formaciones Los Pasos (VMS Kuroko), Las Calderas (Skarn), Mataguá (Au-Ag tipo *Iron Hill* y *Skarn*) y los macizos granitoides (Cu-Mo±Au porfírico). El complejo Anfíbolítico Mabujina, por su parte, alberga mineralización de Cu-Au±Ag en secuencias volcánicas metamorfizadas y porfírica asociada a cuerpos intrusivos ácidos. Todos los modelos de depósito señalados responden a la existencia en la región de dos sistemas minerales: 1) de sulfuros masivos volcanogénicos y 2) porfírico-epitermal de metales preciosos y base el segundo. El primero de los mencionados sistemas controla espacial y genéticamente los depósitos VMS, caracterizándose por su asociación con centros volcánicos y por la dominante procedencia magmática del azufre (S). El segundo sistema controla espacial y genéticamente los depósitos de Au-Ag tipo *Iron Hill* y de *Skarn*, así como los de Cu-Mo±Au porfírico, ubicados más abajo en el perfil. Si bien la región tiene condiciones geológicas generales favorables para la presencia de mineralización, no presenta una potencialidad comparable a la de zonas semejantes bien conocidas de otras partes del mundo. No obstante, en ella es posible encontrar, al menos, dos o tres depósitos VMS y uno de tipo porfírico de interés por su tamaño.

ABSTRACT

An evaluation of the base and precious metal mineral potential of the Cretaceous Volcanic Arc rocks was carried out in Central Cuba, taking into account previous research and the interpretation of the available geologic, geochemical and geophysical information. As a result, it was concluded that Los Pasos (VMS Kuroko), Las Calderas (Skarn), Mataguá (Au - Ag Iron Hill type and Skarn) formations, as well as the plutonic massifs (Porphyry Cu - Mo ± Au) are the main mineral host units. On the other hand, the Mabujina Amphibolitic Complex contains Cu-Au±Ag mineralization in metamorphosed volcanic sequences, and porphyry mineralization associated to acid intrusive bodies. All these deposits respond to the existence of two mineral systems in the arc: 1) volcanogenic massive sulphides, and 2) porphyric-epithermal. The first controls spatially and genetically the VMS deposits, and it is characterized by both its association to volcanic centers, and to the dominant magmatic origin of its southern portion. The spatial and genetic control of the second system include the deposits of Au - Ag of Iron Hill and Skarn types, but also those of porphyry Cu - Mo ± Au, located lower into the profile. Although the region presents favorable geological conditions for the occurrence of mineral deposits its potentiality is not comparable to those of similar well-known areas in the world. However, it is possible to find, at least, two or three VMS deposits and one of porphyry type of interesting sizes.

INTRODUCCIÓN

El Arco Volcánico Cretácico de Cuba central constituye una porción del Arco Volcánico Cretácico de las Antillas Mayores, el cual abarca, en la región central de Cuba, un área aproximada de 3315 km², siendo su extensión real mayor, pues está cubierto en parte por las secuencias sedimentarias de las cuencas superpuestas y de la cobertura Neógeno-Cuaternaria. Las secuencias que lo integran constituyen un complejo volcanógeno-sedimentario, extendido de WNW a ESE por las provincias de Cienfuegos, Villa Clara y Sancti Spiritus, cuya edad va desde el Cretácico Inferior (Neocomiano) hasta el Cretácico superior Campaniano. Esta secuencia es cortada y atravesada por varios macizos intrusivos granitoides, dispuestos a lo largo del mismo, constituyendo el eje magmático principal.

El territorio, ubicado en la parte central de Cuba (Fig. 1), está cubierto por una buena red de comunicaciones, localizándose dentro de él, o en sus cercanías las ciudades de Cienfuegos, Santa Clara y Sancti Spiritus, capitales de las tres provincias mencionadas. Junto a la primera de estas ciudades se encuentra el importante puerto de la Bahía de Cienfuegos. En él se conoce la existencia de depósitos minerales de Au, Ag y metales base desde la primera

mitad del siglo XIX, cuando comenzaron a ser explotados, en lo fundamental, para la obtención de cobre. Así, con anterioridad a 1850, se iniciaron las extracciones de mineral, discontinuas en el tiempo, en el depósito, de tipo VMS Kuroko, San Fernando. En la primera mitad del siglo XX fueron objeto de explotación otros depósitos similares, como Los Cerros, Independencia, Antonio y Fortuna-Casualidad. También fue objeto de explotación el depósito de skarn de Cu nombrado Guaos. No obstante, los volúmenes de mena extraídos fueron, en todos los casos, muy modestos, siendo solo los tres primeros depósitos mencionados los explotados en modo más o menos considerable.

En la segunda mitad del siglo XX, en la región central de Cuba y dentro de ella en el Arco Volcánico Cretácico, fueron ejecutados numerosos trabajos de exploración geológica con diversos grados de detalle. Igualmente, entre 1970 y 1990 se realizaron algunos levantamientos geológicos regionales a escalas 1:250 000, 1:100 000 y 1:50 000. Igualmente se ejecutó un levantamiento geofísico aéreo (espectrometría gamma y magnetometría) a escala 1:50 000. Finalmente, entre 1993 y 1998 trabajaron en la región algunas compañías exploradoras "junior", las cuales realizaron, en su mayoría, trabajos de reconocimiento geológico.

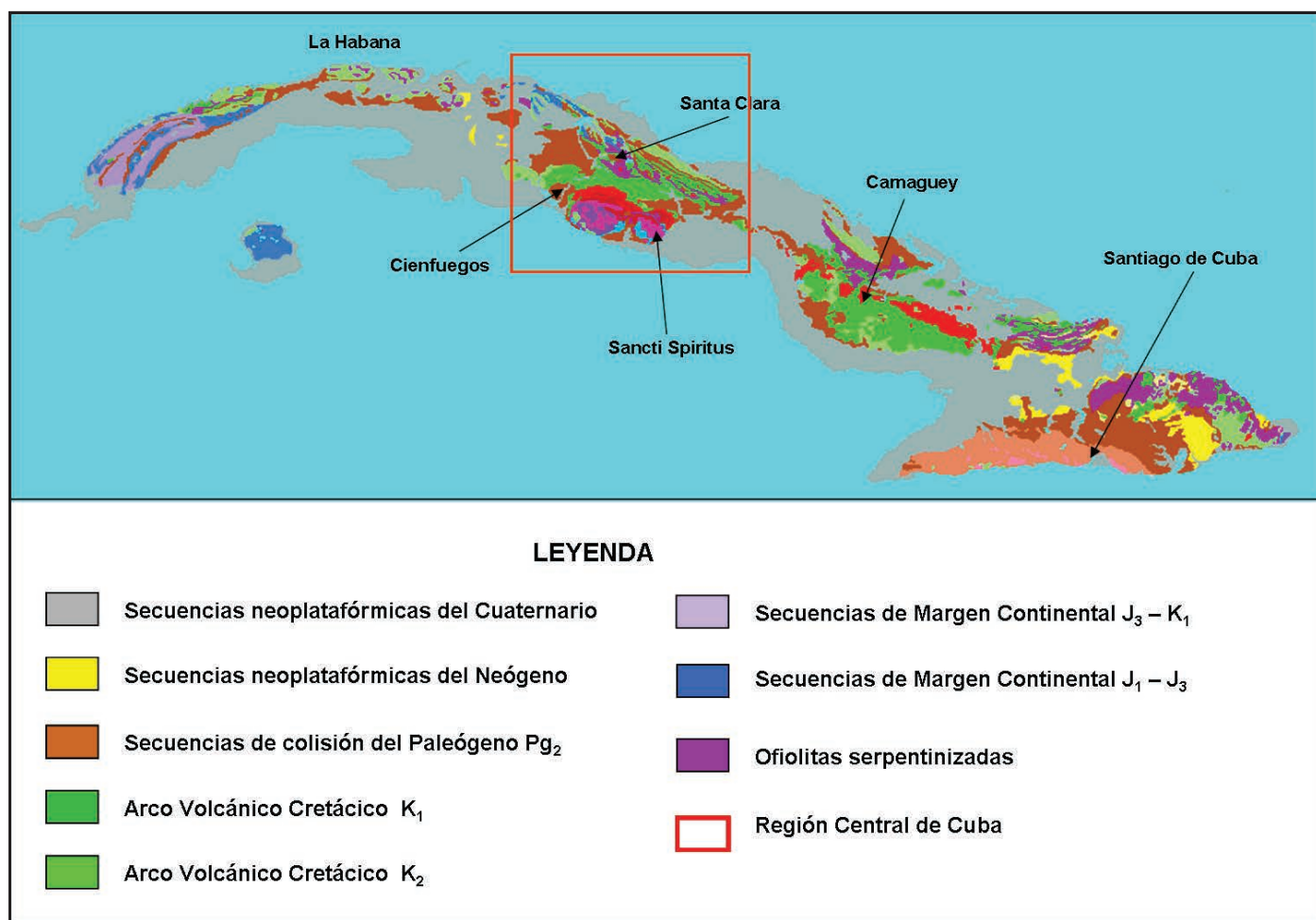


Figura 1. Ubicación del territorio objeto de estudio

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y la disponibilidad de información geológica, geoquímica y geofísica existente, se llevó a cabo la evaluación del potencial de recursos para Au, Ag y metales base del Arco Volcánico de Cuba central, asumiéndose la favorabilidad regional de esta parte del Arco Volcánico Cretácico para la presencia de depósitos de metales preciosos y base, especialmente en la zona de desarrollo del volcanismo bimodal.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la ejecución de las investigaciones se utilizaron como fuentes iniciales de información las siguientes:

- Mapa Geológico Digital de Cuba a escala 1:100 000, confeccionado por el Instituto de Geología y Paleontología.
- Mapa lito-tectónico foto-interpretado a escala 1:50 000 de la Fm. Los Pasos (Capote, 1999).
- Informes geológicos disponibles.
- Bases de Datos elaboradas por la Empresa Geominera Centro, de las cuales fueron tomados los datos geoquímicos primarios empleados en la investigación.
- Mapas gamma espectrométricos aéreos de los canales K, U(Ra) y Th y mapa aeromagnético de campo total reducido al polo de la región central de Cuba, todos a escala 1:50 000, suministrados por el Departamento de Geofísica del Instituto de Geología y Paleontología.

Los datos correspondientes a los diferentes métodos geoquímicos, obtenidos todos mediante análisis espectral semicuantitativo, fueron tomados de la Base de Datos Levantamientos Geológicos Regionales de Cuba Central, de la BD Antonio-Independencia y de la BD Litogeoquímica Zona Centro, confeccionadas todas por la Empresa Geominera Centro.

Todos los mapas monoelementales en formato raster fueron obtenidos mediante interpolación por el método del promedio móvil por el inverso de la distancia. Luego, a partir de estos mapas, se obtuvieron los correspondientes a los de relaciones multiplicativas y complejas entre elementos.

Los datos geofísicos utilizados proceden de los levantamientos aerogeofísicos (espectrometría de rayos gamma y magnetometría) a escala 1:50 000, efectuados en la región central de Cuba (provincias Villa Clara, Sancti-Spiritus y Cienfuegos). Otros materiales empleados son la base de datos de la información topográfica, a escala 1:100 000 y el mapa geológico, en formato digital, a escala 1:100 000, para toda el área.

Los referidos levantamientos aerogeofísicos fueron ejecutados como parte de la cooperación técnica entre organismos cubanos y soviéticos. Las líneas principales de vuelo fueron en la dirección N-S, espaciadas 500 m, mientras que las transversales de control, fueron en la dirección E-W espaciadas 10 km. Los vuelos realizados de forma individual entre 1981-1990 se compensaron

y llevaron al nivel de la Red Nacional de Apoyo efectuada en el año 1987 (Russanov y Prieto, 1987). La información fue registrada a una altura media de vuelo de 60 m, y la exactitud en el plano fue de 50 m. La navegación en los equipos de vuelo fue seguida y controlada mediante la toma de fotos en puntos de orientación seleccionados a un intervalo medio de 3,5 km.

Después de la realización de los levantamientos, todos los datos fueron inicialmente interpolados y compilados en mapas de curvas de contorno en papel, y se acompañaron de reportes técnico-económicos en cada sector (Liubi y otros, 1981; Martinova y otros, 1985; Padilla y otros, 1994). Posteriormente, los datos fueron reprocesados digitalmente, por el Departamento de Geofísica del Instituto de Geología y Paleontología (IGP), obteniéndose los correspondientes mapas en formato raster gamma espectrométricos y magnéticos aéreos, utilizados en el presente estudio. Estos últimos tienen aplicado el filtro de reducción al polo, con lo cual la respuesta magnética cartografiada está centrada con respecto a sus fuentes de origen.

Como paso inicial para el estudio y caracterización metalogénica de la región, se efectuó una recopilación y análisis de la información existente en los informes de trabajos anteriores sobre ella y sus depósitos minerales. Así, fueron consultados informes de levantamientos geológicos regionales, de búsqueda (reconocimiento) a escalas 1: 25 000 y 1:10 000, de prospección y exploración geológicas y trabajos temáticos de diferente índole. Como resultado de este proceso, se compiló y generalizó información sobre un total de 224 depósitos minerales metálicos (prospectos, manifestaciones y puntos de mineralización) de oro, plata y metales base. La misma fue completada y verificada con la contenida en la BD de fichas resumidas de depósitos metálicos de Cuba. Esta información, sistematizada y generalizada, sirvió de base para identificar los modelos descriptivos de depósitos minerales metálicos portadores de Au, Ag y metales base presentes en la región objeto de estudio y para clasificar por modelo los mencionados depósitos. Igualmente, permitió seleccionar las evidencias a utilizar en la integración de datos espaciales con vistas a la evaluación del potencial de recursos minerales.

La investigación, en general, fue ejecutada siguiendo la metodología multiestadio de evaluación del potencial de recursos minerales, expuesta y fundamentada por Bonham-Carter (1994), la cual incluye tres estadios principales. El primero de ellos comprendió la entrada de todos los datos apropiados para la creación de la base digital de datos espaciales. El segundo, tuvo como objetivo el procesamiento de esa base de datos, para extraer de ella los rasgos distintivos del tipo de mineralización esperada, a ser utilizados como evidencias. Finalmente, el tercer y último estadio comprendió la combinación de las evidencias previamente extraídas y la creación de los mapas predictivos de potencial.

El modelo de superposición indexada de mapas de evidencias fue asumido para la integración de los datos en el presente estudio, siendo aplicado a cinco modelos de depósitos minerales de metales preciosos y base: tres descriptivos, uno genético y uno descriptivo informal. Los mapas de evidencias utilizados

fueron creados a partir de la clasificación de los mapas raster de las diferentes fuentes de información (mapas geoquímicos, de formaciones productivas, geofísicos y otros), o a partir de corredores (*buffers*) establecidos sobre la base de la proximidad a determinados rasgos geológicos (fallas extraídas del mapa geológico, por ejemplo).

Como resultado de la generalización y análisis de las características de los depósitos minerales de Au, Ag y metales base conocidos en la región de estudio, una parte de los mismos pudo ser clasificada como perteneciente a alguno de los seis modelos descriptivos identificados:

- Sulfuro masivo volcanogénico de Cu-Pb-Zn±Au, Ag tipo Kuroko
- Au-Ag tipo Iron Hill
- Cu-Mo±Au porfírico
- Skarn de Cu
- Skarn de Fe-Cu
- Skarn de Fe

Para la evaluación del potencial se consideraron los tres primeros modelos descriptivos. Los otros tres, relacionados con el skarn, fueron agrupados en un solo modelo, aprovechando su pertenencia a un mismo modelo genético y la presencia en ellos, en consecuencia, de cierto número de regularidades (evidencias o guías de exploración) comunes a los tres. Además, se elaboró un modelo descriptivo informal para los depósitos de Cu-Au hospedados en secuencias de arco volcánico regionalmente metamorfizadas. La confección de este modelo informal se debió a la imposibilidad de clasificar estos depósitos en uno u otro modelo descriptivo, a causa de su generalizado bajo grado de estudio. Esta decisión también tuvo en cuenta la posible importancia del aporte de esta clase de mineralización al potencial de recursos de Cu y metales preciosos de la región. Para ello se emplearon los datos geológicos disponibles y se analizó su comportamiento con respecto a los radioelementos K, U y Th.

Para determinar los pesos de las clases correspondientes a cada evidencia geoquímica disponible para la integración automatizada de datos espaciales, se partió de su correspondencia con los umbrales geoquímicos anómalos para el elemento analizado. En el caso de las relaciones multiplicativas y complejas entre elementos, se realizó además el examen de la distribución en los mapas geoquímicos de los depósitos conocidos pertenecientes a los diferentes modelos de depósitos utilizados.

En el caso de las evidencias geofísicas, los pesos correspondientes a cada clase fueron determinados mediante el cálculo de la densidad de depósitos pertenecientes a cada modelo. Para las evidencias geológicas, la asignación de pesos a las clases (unidades litoestratigráficas favorables) se realizó a partir de la abundancia relativa de depósitos de cada uno de los modelos considerados dentro de cada unidad.

Para las evidencias tectónicas se dispuso de dos fuentes: la capa tectónica del mapa geológico digital a escala 1:100 000 del IGP, empleada como evidencia principal, y el mapa litológico-tectónico fotointerpretado a escala 1:50 000 de la Fm. Los Pasos (Capote, 1999). Dada la pequeña cobertura espacial de la segunda fuente de información, la misma se utilizó como evidencia complementaria solo para los depósitos del tipo VMS Kuroko, por ser la citada Fm. Los Pasos la principal unidad hospedera de depósitos de este tipo en la región objeto de estudio. La evidencia del control magmático fue construida a partir del mapa geológico, mediante la confección de un mapa de corredores entorno a los cuerpos intrusivos cartografiados en el mismo.

Los rangos de clase, que componen todos los mapas de evidencias confeccionados, fueron reclasificados en un rango de valores entre 0 y 10. Con ello se aseguró la igualdad inicial de peso entre todas las evidencias, una condición necesaria para el diseño correcto de las ecuaciones finales de integración de evidencias.

A la hora de realizar la asignación de pesos a cada una de las evidencias consideradas, para evaluar el potencial cualitativo de recursos correspondiente a cada uno de los cinco modelos de depósitos de metales preciosos y base objeto de análisis, las evidencias fueron clasificadas en tres tipos, de acuerdo con su función dentro del proceso de integración de datos espaciales (evaluación cualitativa del potencial de recursos):

- **Evidencia principal:** Evidencias contributivas básicas en la evaluación del potencial del modelo considerado. Ellas ofrecen información en toda el área de trabajo.
- **Evidencia complementaria:** Evidencias contributivas cuya función es incorporar a la evaluación del potencial información adicional, que precisa y destaca la distribución espacial de las zonas más perspectivas. Su carácter complementario deriva del hecho de que las mismas, en algunos casos, introducen, en el resultado de la evaluación del potencial, cierta influencia del grado de estudio de las diferentes partes de la región, razón por la cual se les asigna un peso de evidencia menor que a los mapas de evidencias principales, aunque siempre proporcional a su importancia, con el fin de minimizar esa influencia al efectuar la integración. También son evidencias complementarias aquellas que realzan la señal útil contenida en otra evidencia, razón por la cual entran en el proceso de integración con un peso inferior al asignado a la evidencia principal.
- **Evidencia excluyente:** Evidencia de naturaleza restrictiva, cuya presencia en un área dada es necesaria e imprescindible para que el modelo analizado pueda ser hallado dentro de la misma. Si la condición (evidencia) está presente, puede buscarse el tipo de mineralización dado en el área objeto de análisis. Si no está presente, el área puede ser descartada.

La ponderación de las evidencias se llevó a cabo dirigido por el conocimiento (criterios de expertos). La ponderación, así como las consideraciones antes expuestas, sirvieron para elaborar las ecuaciones de integración de evidencias a utilizar en la obtención de los mapas de potencial de recursos minerales.

RESULTADOS

Geología

La Fm. Los Pasos (Cretácico inferior Hauteriviano), ubicada en la parte meridional de la región de estudio (Fig. 2) es una secuencia volcánica submarina bimodal, formada por una sucesión de rocas máficas y félsicas, efusivas, subvolcánicas e intrusivas, la cual constituye un conjunto de ciclos volcánicos que van desde flujos basálticos basales, localmente almohadiformes, pasando por los de composición andesítico-basáltica y por piroclastitas de igual composición, para culminar con rocas volcánicas félsicas, principalmente piroclásticas, de composición riolítica. El tope de cada ciclo es cubierto por la base del siguiente, lo que crea una serie de contactos riolita-basalto, constitutivos de horizontes mineralizados, típicos en distritos de sulfuros masivos volcanogénicos (Botrill, 1999). El límite inferior de esta formación no se observa, a causa de la presencia de las rocas intrusivas granodioríticas del Macizo Granitoide Manicaragua, de edad Cretácico Superior (Vázquez y otros, 2010).

En esta formación es abundante la presencia de diques, tanto preminerales como postminerales. Los diques tienen buzamientos entre 70 y 90 grados, con rumbos similares a los de las estructuras tectónicas de la zona. Los más viejos son los basálticos o andesítico-basálticos, fuertemente alterados y cataclastizados, a veces sustituidos por minerales secundarios acompañados por sulfuros. Los diques de andesitas, dioritas y dacitas son más jóvenes y atraviesan toda la secuencia volcanogénica de esta unidad (Gallardo y otros, 1991).

La mineralización en esta formación se ubica hacia el contacto riolita-basalto, o de rocas efusivas medias (andesítico-dacíticas) con las básico-medias (lavas basáltico-andesíticas almohadiformes y sus clastolavas) que las cubren. Las rocas alteradas y silicificadas constituyen el yacente de la mineralización, la cual a su vez puede estar cubierta por una capa de silicitas con pirita (Gallardo y otros, 1991; Delgado y otros, 1992).

Esta unidad litoestratigráfica contiene un total de 22 depósitos conocidos clasificados en uno u otro modelo descriptivo de depósito mineral, de los cuales 18 se consideran del tipo Sulfuro masivo volcanogénico de Cu-Pb-Zn±Au, Ag tipo Kuroko, para un 81,8% del total.

La Fm. Las Calderas (Cretácico Superior Turoniano), situada en la parte SW de la región (Fig. 2) está compuesta por basaltos, basalto-andesitas, andesitas, diabasas, algunas traquiandesitas, tobas básicas y dacíticas. También aparecen pórfidos dacíticos y riolíticos, basalto-andesíticos y pequeños cuerpos de gabro-dolerita. En la parte media y superior de esta unidad aparecen las calizas marmolizadas y skarnificadas grises a blancas del Miembro Guaos, las cuales se interstratifican con corneanas. La skarnificación y la cornificación se asocian con la presencia de intrusivos ácidos riolíticos y dacíticos más jóvenes, los cuales cortan a esta unidad. Con ellos se relaciona también la presencia de diques y mineralización metálica. En esta unidad, los minerales asociados con mineralización endógena en las muestras de jagua son oro nativo, calcopirita, corindón y barita. La pirita y

la epidota son, por su parte, de distribución más regional. La skarnificación es muy variable en intensidad, pero siempre conforme a bandeamiento o estratificación de las calizas. Hay skarns monominerales granáticos, magnetíticos y epidóticos.

En esta unidad se ubican diez depósitos conocidos, clasificados en uno u otro modelo de depósito mineral, de los cuales el 80% son depósitos del tipo genético de skarn, correspondientes a los modelos Skarn de Cu (cuatro depósitos), Skarn de Fe-Cu (tres depósitos) y Skarn de Fe (un depósito). Finalmente hay un depósito de Cu-Mo porfírico y otro clasificado, de acuerdo con el grado de estudio actual, como tipo Iron Hill.

La Fm. Mataguá es de edad Cretácico Inferior Aptiano-Cretácico Superior Turoniano (Fig. 2). Está formada por lavas, lava-brechas y tobas de composición andesítica, andesítico-basáltica y basáltica, incluyendo además silicitas, tufitas y calizas. Las secuencias de esta unidad son cortadas por varias generaciones de diques, verticales y subverticales, siendo las más viejas las de composición basáltica, seguidas por las andesíticas y dacíticas. Los diques más jóvenes son los de pórfidos riódacíticos, los cuales forman cuerpos subvolcánicos en la base de esta formación, en el contacto con la infrayacente Fm. Los Pasos. Contiene 18 depósitos conocidos clasificados en uno u otro modelo descriptivo, de los cuales nueve (50%) constituyen depósitos de skarn, distribuidos en los modelos Skarn de Cu (dos) y de Skarn de Fe-Cu (siete). Hay ocho depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill (el 44,4%) y uno de Sulfuro masivo volcanogénico de Cu-Pb-Zn±Au, Ag tipo Kuroko.

De edad Jurásico-Cretácico Inferior, el Complejo Anfibolítico Mabujina está compuesto por anfibolitas de aspecto metaporfírico, anfibolitas esquistosas bandeadas de grano fino y gabro-anfibolitas. Están presentes igualmente anfibolitas metaefusivas, de grano fino y color verde a verde oscuro, ocurriendo anfibolitas con apariencia diorítica, de grano medio a grueso y de color verde claro. También hay anfibolitas metatobáceas, gneisses metagranitoides con partes cuarzo-dioríticas englobadas por gabro- anfibolitas, y hornblenditas, con abundantes diques de pegmatitas ácidas y aplitas. Este complejo está metamorfozado en un régimen de media a alta temperatura y baja presión, siendo cortado en numerosos lugares por intrusivos granodioríticos más jóvenes, generalmente pertenecientes al Macizo Granitoide Manicaragua.

En el Complejo Anfibolítico Mabujina aparecen ocho depósitos conocidos, clasificados en uno u otro modelo descriptivo, siete de ellos en el tipo Cu-Mo±Au porfírico (87,5% del total) y uno de Au-Ag tipo Iron Hill (12,5% restante). La presencia de los depósitos pertenecientes al primero de los modelos descriptivos mencionados se relaciona espacialmente con intrusivos granodioríticos ciegos o subaflorantes, que cortan la secuencia anfibolítica, y/o con gneisses metagranitoides, representando el 20% del total de depósitos de este tipo presentes en toda la región.

La mayor parte de la mineralización presente en las anfibolitas (37 ocurrencias minerales de diferentes categorías, no clasificadas por modelos descriptivos) es cuprífera y de Cu-Au mesoepitermal. Los minerales de mena observados en estas

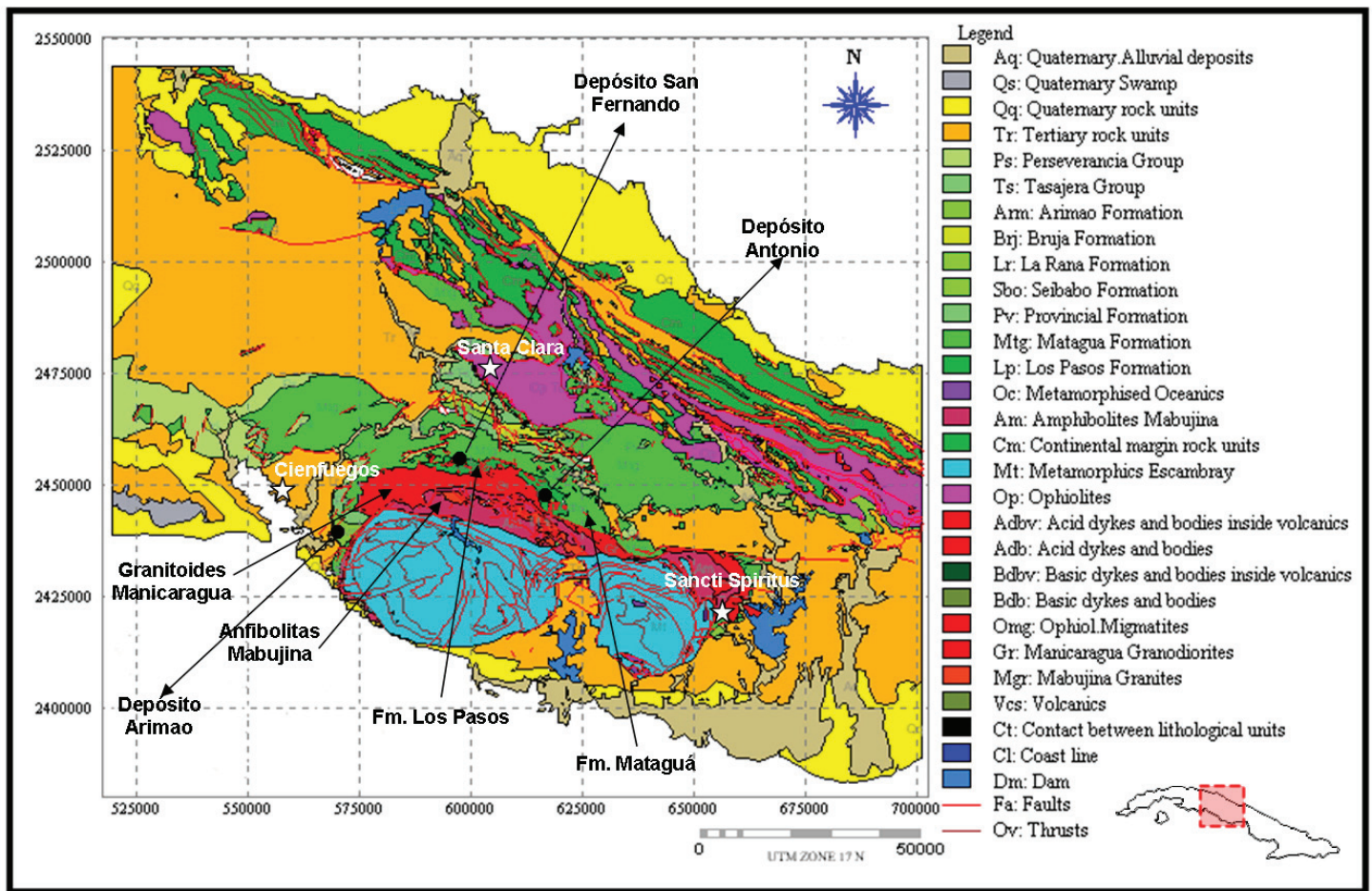


Figura No 2. Area para la cual se realizó la evaluación del potencial de recursos minerales. Mapa geológico de Cuba Central (ACC, 1988).

ocurrencias son calcopirita, malaquita, azurita, pirita y oro nativo. La mineralización se hospeda en anfibolitas metagabroides y metadioríticas bandeadas, silicificadas, epidotizadas y carbonatizadas (Montano *et al.*, 2001).

Los granitoides del Arco volcánico Cretácico y de las Anfibolitas Mabujina (Fig. 2), aparecen dispuestos en una franja de 100 km de largo y de 1 a 15 km de ancho, siendo los principales macizos los de Manicaragua (250 km²), Sipiabo (40 km²), Las Tosas (20 km²) y Sancti Spiritus (60 km²). Además de estos grandes cuerpos intrusivos, existen otros pequeños de granodioritas emplazados dentro de la Fm. Los Pasos, en su sección inferior. Todos ellos tienen rasgos geológicos y petroquímicos similares, representados por un amplio espectro de rocas, que va desde diorita hasta granito y pegmatita. Los granitoides que afloran dentro del Arco volcánico Cretácico no metamorizado son sódico-potásicos, mientras que los del Complejo Anfibolítico Mabujina son de carácter sódico.

En las áreas de afloramiento de los macizos intrusivos granitoides se localizan un total de 25 depósitos del tipo Cu-Mo±Au porfírico, lo cual representa el 71,4% del total de depósitos conocidos clasificados en este modelo en toda la región.

De un total de 224 ocurrencias minerales de metales preciosos y base de todas las categorías (prospecto, manifestación y punto de mineralización) registradas en la región objeto de estudio, un total de 87 pudieron ser clasificadas en alguno de los cuatro modelos de depósitos identificados, distribuidos del siguiente modo (Tabla I):

Aunque fue posible precisar el modelo descriptivo al cual responde cada uno de los depósitos de skarn conocidos (de Fe, Fe-Cu y de Cu), éstos se consideraron en un solo grupo, de acuerdo con su modelo genético general, con vistas a la evaluación de su potencial de recursos.

Geoquímica

Como resultado del procesamiento de la información primaria disponible, se obtuvieron los mapas monoelementales de Ag, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni y Co para flujos de dispersión (sedimentos de fondo) y para suelo. No obstante los dos primeros presentan serias limitaciones en la cobertura espacial de datos dentro del territorio estudiado, pues solo cubren la parte más septentrional del Arco Volcánico Cretácico de Cuba central. El de Pb, por su parte, está limitado por la baja calidad analítica

de los resultados de laboratorio. Por otra parte, el método de flujo de dispersión es el único que cubre la totalidad del área de estudio, abarcando el muestreo de suelo solo algunas partes del territorio. El muestreo de afloramientos y fragmentos eluviales de rocas (litogeoquímica), se limita a abarcar pequeñas áreas, razón por la cual sus resultados no fueron empleados en la evaluación de potencial.

A pesar de lo anterior, resultó posible diferenciar los distintos modelos de depósitos considerados en la evaluación del potencial por su respuesta geoquímica. Así, de modo general, el Cu refleja, en mayor o menor grado, la presencia de depósitos de los tipos VMS Kuroko, Cu-Mo porfírico y de Skarn. El Zn, por su gran movilidad, brinda una respuesta variable, desde muy buena hasta pobre, para los depósitos polimetálicos del tipo VMS Kuroko, siendo prácticamente nula para los depósitos de Cu-Mo porfírico. Los depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill, por su parte, carecen de respuesta tanto en los mapas de Cu como en los de Zn.

El mapa monoelemental de flujo de dispersión de Ni resulta de interés por mostrar un comportamiento inverso, a escala regional, entre concentración de Ni y desarrollo de mineralización de metales base y preciosos, delimitando bien el área abarcada en la región central de Cuba por el ambiente geotectónico de arco volcánico insular, el cual aparece en general bien delimitado, sobre todo por su flanco norte, producto del marcado contraste en la abundancia regional de Ni entre las secuencias del Arco Volcánico Cretácico y las pertenecientes al Cinturón Ofiolítico Cubano. Por su flanco meridional también hay contraste, aunque mucho menor, entre el contenido de Ni en las secuencias del arco volcánico y las del margen continental del Terreno Escambray. No obstante este es suficiente para producir en el mapa una buena y clara separación entre ambas unidades geotectónicas. Resulta notable la capacidad resolutoria de este mapa monoelemental en el sentido indicado, dadas las conocidas limitaciones propias del método geoquímico de flujo de dispersión en cuanto a la tendencia a desplazar las anomalías con relación a sus fuentes de origen, lo cual obliga a tener en cuenta la distribución de las cuencas a la hora de interpretar sus resultados.

Dentro del Arco Volcánico Cretácico, los contenidos más bajos de Ni se observan en los intrusivos granitoides y en la Fm. Los Pasos (entre 5 y 20-25 ppm), seguidas, con contenidos medios algo más altos, por las formaciones Mataguá, Cabaiguán (18 a 35-40 ppm) y Las Calderas (20-75 ppm). En el flanco meridional del arco se separa claramente, con concentraciones medias ligeramente más elevadas, el Complejo Anfíbolítico Mabujina

(25-60 ppm) y, menos claramente, la Fm. Porvenir (25-35 ppm). En el flanco SW del Terreno Escambray el Complejo Anfíbolítico Mabujina muestra concentraciones de Ni algo más elevadas (hasta 75 ppm). Desde el punto de vista de la mineralización, cabe destacar que alrededor del 90% de todas las ocurrencias minerales conocidas (224, sin importar su categoría ni su clasificación por modelo descriptivo) de metales preciosos y base del Arco Volcánico Cretácico, se localizan dentro del intervalo 4-200 ppm, localizándose el 80% de la cifra total en el intervalo de concentraciones de Ni de 4-55 ppm.

El mapa monoelemental de flujo de dispersión de Co muestra un comportamiento similar al de Ni, estando casi todo el Arco Volcánico Cretácico, excepto una pequeña porción en la parte NE del área de estudio, ubicada en el territorio cubierto por el rango de valores más bajos de concentración de Co (de 0,1 a 25 ppm). No obstante, en comparación con el de Ni, presenta la importante limitación de carecer de cobertura de datos en la parte meridional del territorio cubierto por las secuencias de arco volcánico y en toda el área abarcada por las secuencias de margen continental del Terreno Escambray. Esto lo hace menos resolutorio que el de Ni, tanto en relación con la separación de ambientes geotectónicos como de la litoestratigráfica en el interior del Arco Volcánico Cretácico.

En lo que a las relaciones multiplicativas y complejas entre elementos respecta, la relación multiplicativa $Cu \cdot Zn \cdot Pb$ solo responde con claridad a los depósitos polimetálicos, sean estos del tipo VMS Kuroko o de Skarn, siendo más clara la firma geoquímica de los primeros en este mapa. En cambio, los depósitos del tipo Cu-Mo±Au porfírico solo se reflejan de modo circunstancial. La relación multiplicativa $Pb \cdot Zn$, como era de esperar, refleja muy bien la mineralización polimetálica del tipo VMS Kuroko, reflejando, con menor claridad, la presencia de los depósitos de Skarn. Los depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill, como era también de esperar, no se reflejan en el mapa correspondiente a esta relación multiplicativa.

La relación compleja $(Pb \cdot Zn)/(Cu \cdot Ni)$ en flujos de dispersión destaca la presencia de mineralización polimetálica de tipo VMS Kuroko dentro del Arco Volcánico Cretácico de Cuba central. En ella, 19 de los 21 depósitos conocidos clasificados en este tipo descriptivo (90% del total), se localizan dentro del rango de valores superiores a 0,60, mientras en el rango de 0,40 a 0,60 solo aparecen dos depósitos (el 10% del total).

La relación compleja Cu/Zn en flujos de dispersión, por su parte, responde a la presencia de mineralización del tipo Cu-Mo±Au porfírico, particularmente dentro de las unidades litológicas portadoras de la misma. Así, en el rango de valores igual o superior a 1,0 se localizan 22 de los 35 depósitos clasificados en este modelo descriptivo (62,8% del total). Otros 8 depósitos (22,86%) se hallan en el rango de 0,8 a 1,0. Para los depósitos de Skarn, el rango principal de prospectividad, dentro de las unidades litoestratigráficas favorables, está en el rango de valores iguales o superiores a 1,0, el cual contiene 11 de los 18 depósitos de este tipo clasificados en la región, para un 61% de total. Para los de Au-Ag del tipo Iron Hill, el rango de mayor prospectividad en las unidades litoestratigráficas favorables está entre 0,8 y 1,3, en el

Tabla I. Distribución de depósitos clasificados por modelo.

Modelo	Depósitos
Sulfuro Masivo Volcanogénico de Cu-Pb-Zn tipo Kuroko	21
Cu-Mo±Au porfírico	35
Skarn (de Cu, Fe-Cu y Fe)	18
Au-Ag tipo Iron Hill	13

cual se presentan 11 (84,6%) de los 13 depósitos de la región de estudio clasificados en el mencionado modelo, lo cual refleja la tendencia al equilibrio de los generalmente bajos contenidos de Cu y Zn en este tipo de depósito.

Geofísica

En la región central de Cuba, el campo magnético anómalo reducido al polo presenta un comportamiento complejo y alternante en signo, destacándose la presencia de cuerpos o dipolos de dimensiones variadas a escala regional. En el área ocupada por el Arco Volcánico Cretácico, se destaca el predominio de los máximos magnéticos en la porción NNE, sobre las formaciones Cabaiguán, Taguasco, Zaza y otras de menor extensión territorial (Fig. 3).

Estos máximos relativos están separados unos de otros por zonas de campo magnético anómalo positivo de menor intensidad y ocasionalmente cercanos a cero, que hacia el SSW pueden llegar a transitar, localmente, hacia valores negativos. Así, en el área abarcada por las formaciones Mataguá, Provincial y otras de menor extensión, se acentúa la alternancia de los máximos magnéticos con zonas de valores débilmente positivos y negativos, formando una especie de zona intermedia, al Sur de la cual se invierte la polaridad predominante. En la faja ubicada inmediatamente al S de la zona antes descrita, predominan valores negativos a débilmente positivos, localizándose la misma sobre la Fm. Los Pasos, la parte occidental de la Fm. Mataguá y la parte más septentrional de los intrusivos granitoides del Complejo Manicaragua. El tránsito del comportamiento del campo magnético dentro del Arco Volcánico Cretácico, del predominio de valores positivos intensos al predominio de valores negativos e intermedios, refleja el cambio, en sentido NNE-SSW, de las secuencias volcánico-magmáticas con predominio de rocas básicas hacia las dominadas por rocas ácidas. Dentro de este panorama, cabe destacar la gran variabilidad magnética presentada por las secuencias pertenecientes a la Fm. Mataguá, la cual pasa, en sentido general, de valores positivos e intensos en su porción N y E, a débilmente negativos y negativos en su porción S y W. Por otra parte, en la Fm. Los Pasos predominan los valores débilmente negativos, aunque hay áreas de valores marcadamente negativos y positivos.

El canal gamma espectrométrico de K en el Arco Volcánico Cretácico de Cuba central separa con claridad los depósitos del tipo Cu-Mo±Au del resto de los modelos descriptivos presentes en la región de estudio. La separación más clara se observa con respecto a los depósitos del tipo VMS Kuroko. Estos muestran una bien definida conducta en el mapa gamma espectrométrico de K. Los canales de U y Th son poco informativos en cuanto a la presencia de uno u otro modelo descriptivo en general, aportando solamente un criterio de favorabilidad para la presencia de mineralización de Au, Ag y metales base. Ante la relación K/Th, hay un comportamiento bastante diferenciado de los depósitos de tipo VMS con respecto a los de Cu-Mo porfírico, siendo menos clara con respecto a los de Skarn. En fin, puede concluirse que de todos los mapas espectrométricos analizados, los que constituyen un índice más eficiente en la diferenciación de la mineralización presente por modelo de depósito mineral,

son los del canal gamma espectrométrico de K y el de la relación K/Th. Además de los mencionados, el canal de U es útil como índice complementario para estos tipos de mineralizaciones.

Evaluación del potencial de recursos

Las zonas a recomendar para futuros trabajos de reconocimiento fueron identificadas y delimitadas para cada uno de los cinco modelos de depósitos evaluados sobre la base de la distribución de las zonas perspectivas (de potencial alto y muy alto) en cada uno de los mapas de potencial obtenidos. Así, para los sulfuros masivos volcanogénicos de Cu-Pb-Zn±Au, Ag tipo Kuroko, se identificaron y delimitaron 18 sectores; para los depósitos del tipo Cu-Mo±Au porfírico se delimitaron 19 sectores; para los de Skarn 15 y otros 23 sectores lo fueron para depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill. Finalmente se delimitaron 6 sectores para depósitos de Cu-Au±Ag ubicados en secuencias de arco volcánico metamorizadas.

El montaje de todos estos sectores en un mapa mostró la existencia de superposiciones parciales o totales entre varios de ellos, por lo que se consideró conveniente elaborar dos mapas finales de sectores propuestos, uno para los sectores con perspectivas para la localización de depósitos correspondientes a los modelos VMS tipo Kuroko, Skarn (de Cu, Fe-Cu y de Fe) y Au-Ag tipo Iron Hill, y otro mapa para mostrar los sectores perspectivas para los modelos Cu-Mo±Au porfírico y Cu-Au±Ag ubicados en secuencias metamorizadas del Arco Volcánico Cretácico. De este modo, los límites de los sectores fueron armonizados y optimizados, buscándose siempre la obtención de configuraciones geométricas sencillas. Como resultado final, en el primero de los mapas mencionados se delimitaron 43 sectores con un total de 311,508 km², siendo el área promedio por sector de 7,244 km². En el segundo mapa fueron delimitados 19 sectores, con un área total de 345,906 km², con un área promedio por sector de 18,206 km². Las mayores dimensiones, tanto totales como medias en el segundo mapa, reflejan la menor precisión de la evaluación de potencial realizada en cuanto a la delimitación de las áreas más favorables para la presencia de los dos tipos de depósitos representados en él.

La evaluación cuantitativa del potencial de recursos minerales del Arco Volcánico Cretácico de Cuba central se realizó utilizando el método geoquímico, consistente en estimar el potencial de recursos a partir del área cubierta por las anomalías geoquímicas y la concentración media del componente útil considerado en las mismas, teniendo en cuenta el espesor mineralizado establecido a partir de los datos aportados por los depósitos VMS y de Cu-Mo porfírico mejor estudiados de la región. Esta evaluación se ejecutó por separado para depósitos VMS Kuroko y para depósitos de Cu-Mo porfírico, por ser estos los modelos que concentran la mayor parte del potencial de recursos evaluados para la región.

Como resultado, se obtuvo que de los 18 sectores perspectivas para mineralización VMS Kuroko propuestos para futuros trabajos, solamente dos, o quizás tres, tienen posibilidades de resultar plenamente positivos desde el punto de vista del tamaño del depósito a localizar. Dando por sentado esto,

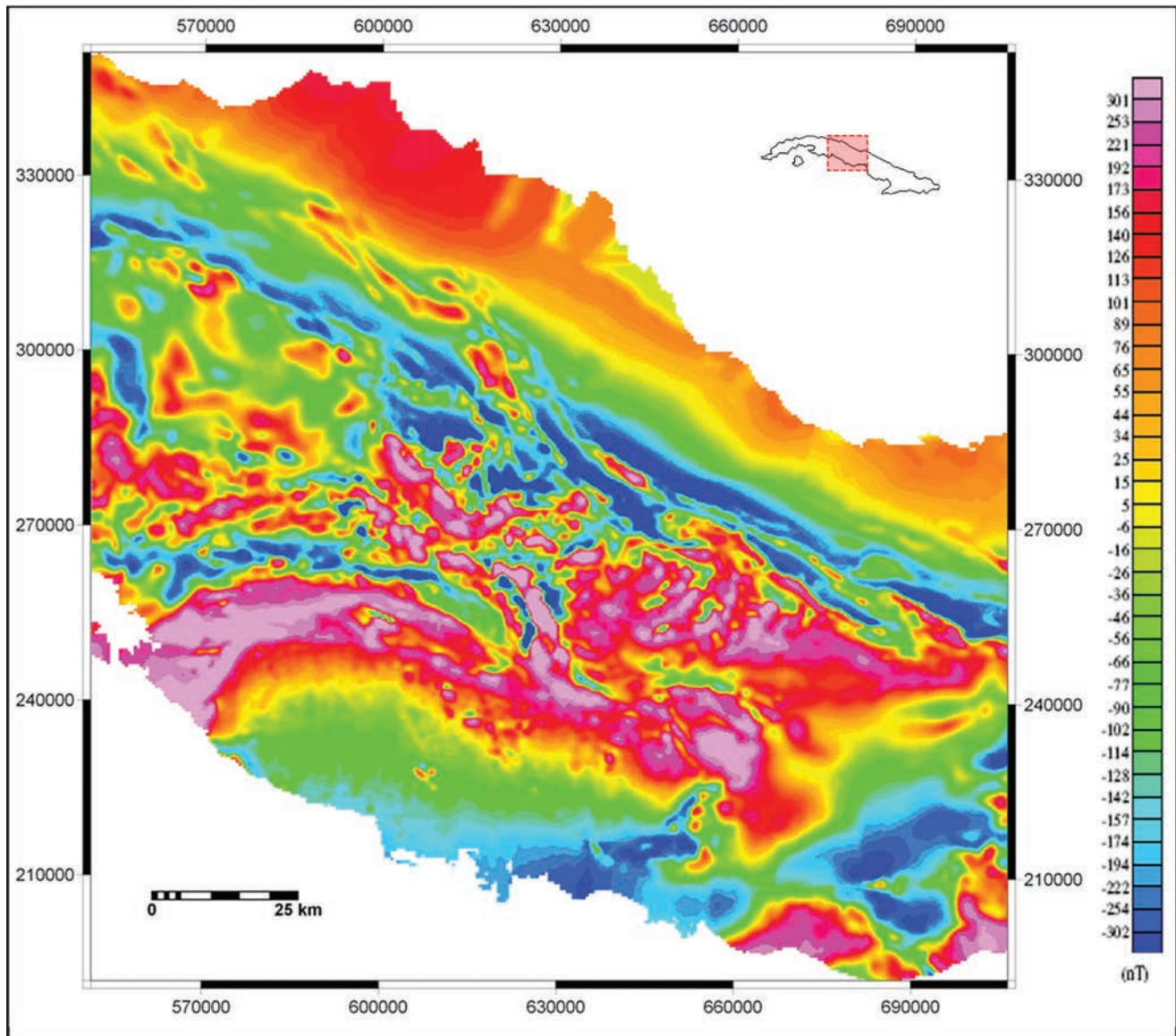


Figura 3. Campo Magnético anómalo reducido al polo en la región central de Cuba.

factores geológicos críticos para la perspectiva económica son la profundidad de yacencia de los cuerpos minerales del depósito y el grado de continuidad espacial de estos, o lo que es lo mismo, el grado de concentración de la mayoría de los recursos en unos pocos cuerpos minerales. Para la mineralización de Cu-Mo porfírica, se determinó que de los 17 sectores prospectivos propuestos para este modelo con vistas a trabajos futuros, solo uno puede resultar plenamente positivo en cuanto a tamaño del depósito. Dando por sentado esto, factores geológicos críticos para la perspectiva económica son la profundidad de yacencia de los cuerpos minerales y la ley promedio de Cu y Mo, así como el contenido de Au en las menas.

DISCUSIÓN

Caracterización metalogenética de las principales unidades hospedadoras de Au, Ag y metales base.

La Fm. Los Pasos se caracteriza, desde el punto de vista metalogenético, por el desarrollo de mineralización de tipo VMS portadora de Cu, Zn, Pb, Ag y Au, con subordinada presencia de depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill. La misma alberga el 85,7% de los 21 depósitos de la región clasificados como VMS Kuroko, incluyendo a los dos más importantes y mejor estudiados (San Fernando y Antonio). Los otros tres depósitos conocidos en

la Fm. Los Pasos, de acuerdo con la información hasta ahora disponible, se clasifican como Au-Ag tipo Iron Hill.

La ausencia de depósitos de skarn en esta unidad se explica, por la ausencia de intercalaciones sedimentarias en su composición litológica. Por último, en esta formación hay un depósito clasificado, por ahora, como del tipo Cu-Mo±Au porfírico, dada la composición cupro-molibdénica de la mineralización reportada y a su localización en el contacto volcanitas-granitoides, en tanto nuevos estudios no aclaren mejor la filiación de este depósito.

Los diques de composición ácida, situados generalmente en dirección sublatitudinal, están asociados a la tectónica de similar rumbo, productora de los mayores desplazamientos verticales en los cuerpos minerales, lo cual indica, a su vez, su carácter postmineral. Gallardo y otros (1991) señalan igualmente que, al menos en la zona de Antonio, los diques tardíos que atraviesan zonas mineralizadas presentan anomalías monoelementales de Cu o Zn (50% de los casos) o complejas de dos o más elementos (Cu, Zn, Ag, Pb y Mo), lo cual demuestra también su carácter postmineral.

Los depósitos de skarn ubicados en la Fm. Las Calderas representan el 44,4% del total regional. Lo anterior indica que, desde el punto de vista metalogenético, esta unidad se caracteriza por su favorabilidad para los depósitos de skarn (de Cu, Fe-Cu y de Fe), pudiendo presentar también mineralización de Skarn de Au (formando parte de depósitos del tipo Iron Hill o en forma independiente). Este comportamiento obedece a la presencia de numerosas intercalaciones y lentes de rocas carbonatadas, la mayoría pertenecientes al Miembro Guaos, en el interior de la secuencia de volcanitas que forma esta unidad litoestratigráfica, afectada a su vez por una intensa actividad ígnea intrusiva ácida, relacionada, en su mayor parte, con los Granitoides Manicaragua. Esta unidad es también favorable para la presencia de depósitos de Cu-Mo±Au porfírico, hospedados en cuerpos intrusivos, lo cual viene dado por la ya mencionada actividad ígnea intrusiva ácida.

Los depósitos de Skarn presentes en la Fm. Mataguá constituyen el 50,0% del total de depósitos pertenecientes a este modelo genético conocidos en la región, mientras los clasificados en el tipo Iron Hill representan el 61,5% del total reconocido como perteneciente a este modelo en toda la región. Ello hace a esta unidad perspectiva para los dos tipos de mineralización, siendo esta conducta metalogenética provocada por la presencia de intercalaciones sedimentarias ricas en carbonatos dentro de ella y a la composición predominantemente básica de las volcanitas que la integran.

La importancia metalogenética de los macizos intrusivos ácidos, como es sabido, radica en ser los portadores naturales de la mineralización porfírica de Cu y Mo, en ocasiones acompañada por Au y Ag, con la cual están genéticamente relacionados. El examen de la carga mineral sobre el mapa geológico muestra, a primera vista y con toda claridad, que, dentro de la región de estudio, la mineralización porfírica es más abundante y mejor desarrollada en la parte occidental del cinturón de intrusivos granitoides que en la oriental. Así, en la mitad occidental se encuentran 21 de los 25 depósitos de Cu-Mo±Au presentes en

ellos. Algo similar ocurre con los ubicados en otras unidades litoestratigráficas, la mayoría de ellos asociados a intrusivos ácidos ciegos. Este comportamiento también se observa con la mineralización de skarn, más abundante y desarrollada en la mitad occidental de la región que en la oriental.

Tipos de depósitos minerales presentes

Los depósitos del tipo Sulfuro Masivo Volcanogénico de Cu-Pb-Zn tipo Kuroko son los mejor estudiados en la región y están bien caracterizados, en particular los dos más importantes conocidos: San Fernando y Antonio. Dublan y otros (1986) identificaron, por primera vez, la presencia de este modelo descriptivo al señalar la pertenencia al mismo del prospecto Antonio.

La mineralización polimetálica VMS de este tipo se desarrolla hacia la parte centro-sur de la región, fundamentalmente dentro de la Fm. Los Pasos, donde se localiza en el contacto entre intrusivos y volcanitas ácidas y básicas, sobreyaciendo a riolitas y dacitas y subyaciendo a lavas y tobas basálticas y andesíticas. Una revisión de las características de los depósitos de este tipo mejor estudiados en la región (San Fernando y Antonio) muestra un elevado grado de ajuste de estos representantes locales con el modelo internacional establecido para este tipo de depósito, tal como es presentado por Höy (1995). Los mismos se asocian con brechas volcanoclásticas intensamente alteradas, silicificadas y sericitizadas, siendo silicificación, cloritización y epidotización las alteraciones relacionadas con ellos. Es de destacar que la continuidad y magnitud de los cuerpos minerales estratiformes han sido muy perjudicadas por el intenso magmatismo postmineral, en su mayor parte subvolcánico, desarrollado en la región, estando la ubicación de muchos de los diques controlada tectónicamente.

La mineralización de Cu-Mo±Au porfírico presenta mayor desarrollo en la parte occidental de la región (Granitoides Manicaragua, Fm. Las Calderas y Fm. Arimao) que en la oriental (Granitoides Sancti Spíritus). Por ello, es la parte occidental de la región la de más perspectiva para este tipo de mineralización, que en Cuba central (como en el resto del Arco Volcánico Cretácico) tiene la importante particularidad de tener con frecuencia mineralización acompañante de Au. Un elemento a destacar con relación a esto último es que los resultados de los estudios realizados hasta ahora en diferentes depósitos de este tipo en la región, sugieren la existencia de una relación inversa entre el contenido de Mo y el de Au.

La mineralización polimetálico-preciosa y magnetítica de skarn, tanto en la parte occidental como oriental de la región estudiada, se caracteriza por presentar cuerpos minerales metálicos pequeños e irregulares, por lo cual sus perspectivas para constituir por sí mismos depósitos de interés económico son mínimas. No obstante, los skarn pueden resultar de interés como fuentes de rocas y minerales industriales tales como granate (grosularia y andradita), epidota, cuarzo y wollastonita. Igualmente, la magnetita presente en ellos puede también ser utilizada como abrasivo.

Los depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill combinan las características

de los depósitos pertenecientes a los modelos descriptivos Au-Ag epitermal de baja sulfuración, skarn de Au y Au-Ag diseminado en carbonato tipo Carlin. Los representantes típicos de este tipo de depósitos se localizan en la parte SE de la provincia Camagüey. En lo que a la firma geoquímica respecta, por ejemplo, para el primero de los modelos descriptivos internacionales mencionados la firma se compone de Au, Ag, Zn, Pb, Cu y As, Sb, Ba, F, Mn; localmente Te, Se y Hg (Panteleyev, 1996); para el segundo es compuesta por los elementos Au, As, Bi, Te, Co, Cu, Zn o Ni (Ray, 1997) y para el tercero por los elementos Au, As, Hg, W o Mo (Schroeter and Poulsen, 1996). Los depósitos Las Breñas y San Juan (seleccionados como patrones locales del tipo Iron Hill en la región Central de Cuba) reportan firmas geoquímicas compuestas por Au, Ag, Cu, Zn, Pb y Hg en el primer caso y por Au, Ag, Cu, Zn, Pb y As en el segundo. Como puede notarse, la firma de ambos depósitos conjuga los componentes principales de las tres firmas geoquímicas previamente citadas. Las alteraciones más relacionadas con la mineralización, por otra parte, son la silicificación, la carbonatización, la skarnificación y la hematización. En este tipo se clasifican aquí no solo aquellos depósitos que, por sus características, responden bien a este modelo, sino también otros de Au-Ag que posteriores estudios pudieran clasificar como epitermales (de baja o alta sulfuración), no diferenciables con el grado de estudio actual. La mayoría de estos depósitos, al igual que los depósitos patrones de este tipo en Camagüey, se relacionan con la presencia de cuerpos intrusivos ácidos en profundidad, portadores de mineralización porfírica.

Sistemas minerales

En el Arco Volcánico Cretácico de Cuba central es posible identificar dos sistemas minerales bien definidos, asociados ambos a la actividad magmático-volcánica propia del mencionado arco volcánico insular. El primero es el asociado con los depósitos de sulfuros masivos del tipo Kuroko. La fuente de metales es de carácter magmático, asociado a los procesos de volcanismo submarino de tipo bimodal. A favor de esto habla la asociación de anomalías de Mo en suelo, superiores al segundo umbral, que llegan a rebasar el tercero, con el depósito VMS Antonio y otras manifestaciones cercanas del mismo tipo descriptivo. El muestreo litogeoquímico confirma las anomalías de Mo cartografiadas por el muestreo de suelo, con intensidades, en este caso, superiores al tercer umbral anómalo.

Por otra parte el estudio de la composición isotópica del S realizado en sulfuros pertenecientes a las menas primarias del depósito San Fernando (Alfonso y otros, 2007), muestran que la $\delta^{34}\text{S}$ en la pirita varía entre -0,5 y 7 ‰, en la calcopirita entre 0,3 y 3,1 ‰ y en la esfalerita entre 1,7 y 1,9 ‰. A pesar del estrecho rango observado, una parte de los valores, aunque cercanos, superan el rango de 0 ± 3 ‰ característico de los basaltos MORB, lo cual, además de indicar el origen magmático de la mayor parte del S, habla en favor de una mezcla de este aporte magmático con S proveniente de la reducción inorgánica, en presencia de calor, del sulfato marino. En el caso de Antonio, el estudio de la composición isotópica del azufre (Gallardo y otros, 1991), mostró valores de +2,6 ‰ en pirita; +1,56 ‰ en esfalerita y de +2,6 ‰ en calcopirita, los cuales indican así mismo la naturaleza magmática del S presente. Para la barita, en cambio, se obtuvo

+17,6 ‰, indicativo de la procedencia mayormente marina de su S. Las vías de migración y sitios de precipitación de menas en este sistema mineral están asociados, en lo fundamental, con los centros volcánicos submarinos.

El segundo sistema mineral vincula la mineralización de tipo porfírica con la suprayacente de skarn y epitermal a través de la fracturación tectónica, la cual sirvió de vía de migración a los fluidos hidrotermales. Así, en la parte superior del corte, aparece la mineralización preciosa microdispersa de baja temperatura, la cual adquiere rasgos del tipo Carlin en presencia de rocas carbonatadas. Más abajo, la mineralización, con mayor o menor cantidad de sulfuros de metales base, adopta las características típicas de los depósitos epitermales (de baja sulfuración), pudiendo aparecer cuerpos de skarn con Au en intercalaciones carbonatadas afectadas por el calor. Finalmente, en la parte más profunda del sistema, en los intrusivos ácidos fuentes de calor, se localiza la mineralización porfírica. De este modo, el sistema controla e integra la presencia de los depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill y de Cu-Mo±Au porfírico, así como los skarns de Cu y Fe-Cu, los cuales contienen también Au y Ag. Los cuerpos intrusivos ácidos, además de ser la fuente de metales para los tres modelos de depósitos señalados, constituye el sitio de acumulación de mena para los de tipo porfírico.

La relación espacial y la distribución vertical de los depósitos de este sistema mineral han sido bien observados en el Distrito Mineral Jobabo, ubicado en secuencias volcánico-intrusivas del Arco Volcánico Cretácico, en el SE de la provincia de Camagüey. La presencia en el mapa de flujo de dispersión de Mo de algunas anomalías de este elemento cercanas a depósitos de Au-Ag tipo Iron Hill dentro de la región objeto de estudio, sugiere, en este sentido, la presencia de intrusivos granitoides, más o menos mineralizados, situados cerca de los mismos, ya sea subyacentes o ubicados en su vecindad.

Evaluación de potencial

Los resultados de la evaluación de potencial estuvieron limitados por la falta de cobertura de datos de Ag y Mo para una parte importante del área de estudio, así como por la baja calidad de los resultados analíticos para el Pb. Otras limitaciones confrontadas fueron la no disponibilidad de información geoquímica regional para Au, la carencia de una buena cartografía de las alteraciones hidrotermales, por itinerarios geológicos y por teledetección. Por otra parte, el empleo de los resultados existentes en la región de PI y métodos electromagnéticos, habría contribuido a la obtención de una mejor y más detallada clasificación del territorio estudiado por su potencialidad para Au, Ag y metales base.

A pesar de lo anterior, resultó posible obtener mapas de potencial de recursos suficientemente diferenciados para cada uno de los modelos de depósitos sometidos a evaluación. En general, la sumatoria de las áreas de alto y muy alto potencial delimitadas para todos los modelos totaliza 557,46 km², para un 17,9% del área total del Arco Volcánico de Cuba central. Es de notar que el área perspectiva total, tanto en unidades de superficie como en porcentaje, es en realidad más pequeña, no superando el 15%, pues existen áreas perspectivas para los

distintos modelos evaluados que se solapan mutuamente en menor o mayor grado.

CONCLUSIONES

El magmatismo medio-ácido constituyó la principal fuente de metales para los diversos tipos de depósitos minerales de metales preciosos y base presentes en el Arco Volcánico de Cuba central.

En los depósitos VMS de tipo Kuroko, la continuidad y magnitud de los cuerpos minerales estratiformes han sido muy perjudicadas por el intenso magmatismo postmineral (diques básico-medios y ácidos) desarrollado en la región de estudio, particularmente en la Fm. Los Pasos.

La mineralización de Cu-Mo porfírico, así como la polimetálica de Skarn presentan mayor desarrollo en la parte occidental de la región con respecto a la mitad oriental.

El mapa monoelemental de flujo de dispersión de Ni muestra un comportamiento inverso, a escala regional, entre la concentración de Ni y desarrollo de la mineralización de metales base y preciosos, delimitando bien el área abarcada en la región central de Cuba por el ambiente geotectónico de arco volcánico insular.

La relación multiplicativa Pb^*Zn y las complejas $(Pb^*Zn)/(Cu^*Ni)$ y Cu/Zn brindan una respuesta específica de elevada calidad ante la presencia de los distintos modelos de depósitos evaluados, diferenciándolos claramente por sus respectivas respuestas ante ellas.

Los modelos de depósitos identificados en la región presentan una conducta diferenciada ante la gamma espectrometría aérea y la magnetometría, destacándose en este aspecto los modelos VMS Kuroko y Cu-Mo±Au porfírico, así como los depósitos de Cu-Au hospedados en secuencias metamorizadas de arco volcánico.

El resultado de la estimación cuantitativa del potencial de recursos para el Arco Volcánico de Cuba Central, permite esperar que dos o tres de los 18 sectores prospectivos para menas polimetálicas tipo Kuroko y uno de los 19 para menas cupríferas de tipo porfírico resulten plenamente positivos desde el punto de vista del tamaño del depósito a localizar, del orden de los tres millones de toneladas de mena en el primer caso y de 60-100 millones de toneladas en el segundo.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias de Cuba y Academia de Ciencias de la URSS. > Mapa geológico de Cuba a escala 1:250 000. 1988. Otros autores. Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de Polonia. Instituto Estatal de Geología de Hungría. Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de la URSS. Instituto de Geología y Paleontología de la Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de Bulgaria.

Alfonso, P., J. C. Melgarejo, J. A. Proenza, A. Gubert, E. Gallardo, X. Cazañas, 2007. *Mineralogy and sulphur isotopes of the San Fernando*

VMS deposit, Central Cuba. En: Andrew, C. J., et al., (Eds). *Diggin`deeper. Irish Association for Economic Geology*, (Dublin, Ireland), 2: 1089-1092.

Bonham-Carter, G. F., 1994. *Geographic information systems for Geoscientists, modelling with GIS, Computer methods in the Geosciences, Volume 13: Elsevier Science Ltd.*, 398 p

Botrill, T. J., 1999. *San Fernando Project. Geology, mineralization and exploration results.* Inédito (Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana).

Capote, C., 1999. *Mapa lito-tectónico foto-interpretado a escala 1:50 000 de la Fm. Los Pasos.* Original inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Delgado, S., E. Millán, R. Moya, R. Ching, J. L. Darías, M. A. Gómez, M. Pérez, P. Uldanivia, 1992. *Prospección Preliminar de Cobre Antonio-Independencia.* Inédito (Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana).

Dublan, L., H. Alvarez, P. Lledías, J. Svestka, C. Vázquez, W. Marsal, E. González, B. Micoch, B. Molak, E. de los Santos, J. Soucek, M. Pérez, A. Mihalikova, L. Bernal, J. Zoubek, M. Ordóñez, R. Lavandero, J. Marousek, J., Manour, R. Pérez, R. Rodríguez, 1986. *Informe final del levantamiento geológico y evaluación de los minerales útiles a escala 1:50 000 del polígono CAME I Zona Centro.* Inédito (Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana).

Gallardo, E., S. Vacak, María A. Gómez, O. Romero, R. Moya, P. Lledías, J. L. Darías, A. Pérez, N. Carballo, P. Uldanivia, N. Pérez, 1991. *Prospección Detallada Cobre Antonio.* Inédito (Oficina Nacional de Recursos Minerales, La Habana).

Höy, T., 1995. *Noranda/Kuroko Massive Sulphide Cu-Pb-Zn, in Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, D. V. Lefebure and G. E. Ray, Editors, British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources*, 1: 53-54.

Liubi, L. I., T. B. Martinova, G. A. Vaciliev, Glikman 1981. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC) en el territorio de las provincias de Santa Clara-Sancti Spiritus, a escala 1:50 000.* Inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Martinova, T. B., V. Torubarov, B. L. Vaciliev, 1985. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC) en el territorio de la provincia de Las Villa, a escala 1 50 000.* Inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Montano, J. L., J. L. Torres, A. Suárez, I. Altarriba, R. M. Lavandero, J. Moreira, M. Pardo, D. González, X. Cazañas, F. Bravo, G. Puentes, 2001. *Reevaluación metalogénica de los recursos minerales de oro, plata y polimetálicos asociados en esquistos negros (secuencias ricas en materia orgánica) Escambray.* Inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Padilla, I., L. Lufriú, L. Corbea, R. M. Pérez, 1994. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC) en el territorio de la provincia de Las Villa-Sancti Spiritus (Escambray), a escala 1:50 000.* Inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Panteleyev, A., 1996. *Epithermal Au-Ag: Low Sulphidation, En Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, D.V. Lefebure and T. Höy, Editors, British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources*, 2: 41-43.

Ray, G. E., 1997. *Au Skarns, Geological Fieldwork 1997.* British Columbia Ministry of Employment and Investment, Paper 1998-1: 24H-H4.

Russanov, V. C., R. L. Prieto, 1987. *Informe sobre los resultados de la Red de apoyo Aerogeofísica Nacional, a escala 1: 50 000.* Inédito (Instituto de Geología y Paleontología, La Habana).

Schroeter, T., H. Poulsen, 1996. *Carbonate-hosted disseminated Au-Ag; En Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, D.V. Lefebure y T. Höy, Editors, British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources*, 2: 9-12.

Vázquez, C., E. Gallardo, Julio E. Pérez, A. Rodríguez, R. Moya, E. Milián, J. R. González, R. Fraga, F. Macola, J. L. Domínguez, 2010. *Informe de la prospección de oro sector sombrero de hierro San Fernando.* Inédito.