

AUTORES

Jorge Luis Torres Zafrá

Xiomara Casañas Díaz

Instituto de Geología y Paleontología,
Cuba, Vía Blanca No. 1002 y Carretera
Central. San Miguel del Padrón CP 11
000, La Habana. zafra@igp.minem.cu

RECIBIDO: DICIEMBRE, 2020

ACEPTADO: DICIEMBRE, 2020

RASGOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE RECURSOS MINERALES

GENERAL FEATURES OF THE METHODOLOGY OF THE EVALUATION OF POTENTIAL OF MINERAL RESOURCES

RESUMEN

El Instituto de Geología y Paleontología - Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC) llevó a cabo, durante el 2020, el proyecto “Guía metodológica para la evaluación del potencial de recursos minerales”, cuyo resultado principal fue la confección de la mencionada guía. Por ello, aquí se ofrece un acercamiento a la evaluación de potencial de recursos minerales como actividad investigativa y a la guía metodológica preparada por el IGP-SGC. Su redacción se llevó a cabo a partir de la consulta y generalización de literatura internacional consultada y de la experiencia propia acumulada por el autor y otros especialistas cubanos. Además de presentar el contenido de la guía, se examinan los antecedentes de la evaluación del potencial de recursos minerales en el mundo y en Cuba y se discuten los rasgos generales de la evaluación de potencial como una fase particular de las investigaciones geológicas. La misma se caracteriza por su flexibilidad metodológica, carácter holístico, aplicabilidad al pronóstico de cualquier clase de recurso geológico y por contener, en su fundamento, el método de la analogía y los principios de la causalidad y la repetitividad de los resultados. Se discute de igual modo, el papel de los modelos de depósitos y de sistemas minerales en la cartografía del potencial mineral.

Palabras clave: recursos minerales, evaluación, potencial, metodología

The Institute of Geology and Paleontology - Geological Service of Cuba (IGP-SGC) carried out during the 2020 the project "Methodological guide for mineral resources potential assessment" whose main result was the one mentioned guide. Hence, here it offers an approach to the mineral resources potential assessment as investigative activity and to the methodological guide prepared by IGP-SGC. Their writing was carried out starting from the consultation and generalization of international consulted literature and of the own experience accumulated by the author and other Cuban specialists. Besides presenting the content of the guide, the antecedents in the world and in Cuba of the mineral resources potential assessment are examined and are discussed the general features of the potential evaluation as a peculiar phase of the geologic investigations. The same one is characterized by their methodological flexibility, holistic character and applicability to the prediction of any kinds of geologic resource. Also to contain in their foundation the method of the analogy and the principles of the causation and the repetition of the results. It discusses in a same way the paper of the models of deposits and of mineral systems in the mineral potential mapping.

Keywords: mineral resources, assessment, potential, methodology

ABSTRACT

Aunque la evaluación de potencial, denominada “pronóstico de minerales útiles” o simplemente “pronóstico” en Cuba, así como en el resto de los países de Europa oriental hasta el año 1990, es una actividad conocida y realizada en el país aproximadamente desde el año 1980, la ejecución de esta etapa de la investigación geológica con fines económicos siempre careció de una instrucción o guía metodológica oficial que reglamentase y uniformase su realización. Esta situación hizo necesaria la confección de una guía metodológica para la ejecución de trabajos de evaluación de potencial de recursos minerales en Cuba, que regule y uniformice el procedimiento para la realización de este tipo de trabajo en el país.

La evaluación de potencial de recursos minerales ocupa un lugar especial dentro de las investigaciones geológicas al constituir el enlace los estudios fundamentales sobre la geología de los yacimientos minerales metálicos, de rocas y minerales industriales y energéticos –la metalogenia y mineragenia– y la geología económica, es decir, la prospección y exploración de depósitos minerales. Sus objetivos básicos se resumen en:

- Conocer la distribución espacial –geográfica y geológica– de los recursos minerales por tipo de materia prima y/o componente útil.
- Establecer la cuantía de la riqueza mineral, es decir, la cantidad de recursos que puede un territorio disponer por materia prima y/o componente útil.
- Delimitar área objetivos (sectores prospectivos) para la prospección y exploración geológica de depósitos minerales, sean estos metálicos, de rocas y/o minerales industriales o de materias primas energéticas.

Para establecer una política bien argumentada y racional de exploración geológica, primeramente, ha de tenerse una respuesta a la pregunta de qué y dónde buscar. Estrechamente vinculada con esta pregunta está la de qué cantidad del recurso considerado se puede esperar encontrar.

Mientras la metalogenia (y mineragenia) responden a la pregunta de qué puede buscarse en el país y explican las causas que determinan la respuesta obtenida, es la evaluación de potencial la que da respuesta completa a las dos preguntas antes planteadas, y lo hace con un nivel de detalle superior, suficiente para poder elaborar una estrategia de exploración y, conforme a ella, programas de exploración geológica adecuadamente argumentados para distintos tipos de recursos minerales. En este sentido, la evaluación de potencial es el eslabón que conecta la metalogenia (y mineragenia) con las etapas de investigación geológica (tal como las entiende la actual Ley de Minas), al delimitar áreas objetivos dentro del extenso territorio en principio favorable para la presencia de un determinado recurso mineral señalado por la metalogenia o la mineragenia, según el caso. Ello es así porque es el único tipo de estudio capaz de cumplimentar esta tarea, debido a que la prospección sistemática de extensos territorios es simplemente incosteable e irracional.

Por otra parte, si bien el mapa metalogénico o mineragénico puede responder sí o no a la pregunta ¿Puede encontrarse el recurso mineral X en el país?, y en caso positivo indicar en que parte del país debe ser buscado, la evaluación de potencial especifica qué cantidad de ese recurso puede existir en el subsuelo y en qué lugares (sectores) deben realizarse trabajos de investigación geológica orientados a su localización y evaluación. Estos dos criterios, junto con la demanda y los precios, establecen cuanta prioridad debe tener el recurso X en la estrategia y programas de prospección y exploración del país.

Otra función de la evaluación de potencial de recursos minerales es contribuir al establecimiento del lugar (espacial y sistémico) de los recursos minerales dentro del medioambiente del cual forman parte, así como dentro del conjunto de recursos, bióticos y abióticos, que el mismo ofrece a la sociedad. Dado el carácter no renovable de los recursos minerales, ha de ser puesta una especial atención en su

administración y manejo, a fin de asegurar el uso sostenible y sustentable, no solo para las generaciones presentes, sino también para las del futuro previsible. En esta dirección se hace imprescindible conciliar los intereses en torno al aprovechamiento económico de estos recursos con los relacionados con el uso y preservación de otros recursos naturales y del medioambiente en su conjunto, lo cual solo es posible conseguir si se dispone de una adecuada información sobre la riqueza mineral y su distribución espacial dentro del territorio sujeto a consideración. De hecho, este ha sido el problema a resolver que en algunos casos ha motivado la ejecución de trabajos de evaluación de potencial, como los llevados a cabo en las provincias canadienses de Columbia Británica (Kilby, 2004) y Ontario (Wilson et al., 2008), destinados a suministrar, en primer término, información sobre los recursos minerales para una más adecuada planificación del uso del suelo.

Por todo lo anterior, acceder a información sistematizada y organizada sobre el modo de realizar correctamente una evaluación de potencial para cualquier recurso mineral es una necesidad de los especialistas cubanos dedicados a la búsqueda de yacimientos minerales. Por ello, en las siguientes páginas los autores se proponen ofrecer un acercamiento a la evaluación de potencial de recursos minerales como actividad investigativa y a la guía metodológica preparada por el IGP-SGC.

Antecedentes

La evaluación de potencial es una especialidad relativamente joven, que comenzó a desarrollarse en la segunda mitad del siglo XX. A pesar de ello, sus antecedentes internacionales son amplios. Por otra parte, los trabajos realizados en Cuba dentro de esta línea temática, iniciados hacia el año 1980 con la ayuda de especialistas de la antigua Unión Soviética y de otros países de Europa oriental, no son pocos.

El antecedente fundamental disponible sobre la metodología de la evaluación de potencial en Rusia se encuentra en los capítulos IX y X

(páginas 432 - 511 del tomo II) del Reglamento metodológico para levantamientos geológicos a escala 1:50 000 (Kumpan, 1986); traducido del ruso por la Editorial Veneshtorgizdat.

En uno de sus párrafos (página 464 del tomo II del mencionado reglamento) se enuncian los cuatro principios o elementos fundamentales de la evaluación de potencial de recursos minerales: 1) especialización de la evaluación de potencial (para una o un grupo de materias primas minerales); 2) identificación y establecimiento de los modelos de depósitos minerales y la correspondiente clasificación por modelos de los depósitos del territorio objeto de estudio; 3) representatividad cartográfica de las evidencias (índices y criterios de exploración) y 4) integración de los datos espaciales de acuerdo con los rasgos y regularidades correspondientes a cada modelo. Asimismo, en el capítulo X “Cartografía geológica de profundidad y volumétrica” (páginas 469 - 515), se establece una clara diferenciación entre la evaluación de potencial y las siguientes etapas de la exploración geológica, la cual se basa en la distinción entre los objetivos y tareas correspondientes a la evaluación de potencial y los que corresponden a los trabajos de exploración geológica (reconocimiento, prospección y exploración).

Por su parte, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) comenzó a desarrollar la metodología de evaluación de potencial conocida como “Método de las Tres Partes” en 1975. Esta metodología fue desarrollada por D. A. Singer y W. D. Menzie, con importantes contribuciones de J. D. Bliss, G. J. Orris, D. L. Mosier, D. P. Cox, N. J. Page y B. L. Reed. Aunque en 1975 quedó completado el diseño metodológico general de este método, no fue hasta 1978 que fueron desarrollados los primeros 11 modelos de ley - tonelaje, que permiten llevar a cabo la parte cuantitativa de la evaluación de potencial. Así, la primera evaluación de potencial realizada por el USGS fue la llevada a cabo a escala 1:250 000 en el territorio del estado de Alaska entre 1975 y 1981 (Singer, 2007).

La primera evaluación de potencial realizada fuera de USA por este servicio geológico empleando el método de las tres partes fue el realizado entre 1983 y 1984 a escala 1:1 000 000 en Colombia (Cox, 1983a y b). Como parte de este trabajo D. P. Cox y D. A. Singer crearon un formato de modelo descriptivo de una sola página, mientras D. A. Singer, B. Berger prepararon una forma gráfica de representar los datos de ley – tonelaje. Un total de 65 modelos descriptivos y 37 modelos de ley – tonelaje fueron aplicados en esta evaluación de potencial. Debido a que la utilidad de esos modelos iba más allá del ámbito de la mencionada evaluación de potencial, el USGS decidió aumentar el número de modelos e incluir en ellos otros aspectos de la modelación de depósitos minerales. Por otra parte, en 1984, adelantándose al USGS, el Servicio Geológico de Canadá publicó una gran compilación de modelos de depósitos de ese país (Eckstrand, 1984). No constituyó ninguna sorpresa el hecho de que los modelos elaborados por ambos servicios geológicos presentasen un alto grado de convergencia y varios de ellos fueron incorporados a la publicación en preparación por el USGS. Como resultado final de todo este proceso, fue publicado el libro titulado “Mineral deposit models” (Cox y Singer, 1986), contentivo de 85 modelos descriptivos y 60 modelos de ley – tonelaje.

El desarrollo de los sistemas de información geográfica se inició en el mundo occidental hacia finales de la década de los 70 del siglo XX con las llamadas “mesas de luz electrónicas”, una línea de trabajo en la cual los geólogos del Servicio Geológico de Canadá fueron pioneros. Anteriormente ya se utilizaba la superposición de mapas geoquímicos mono-elementales (de igual tamaño y escala) en mesas de luz para delimitar áreas altamente favorables para la presencia de depósitos minerales aún no descubiertos, una práctica que pronto se extendió, sobre todo a partir de 1980, a los mapas geológicos y geofísicos. Esta fue una evolución que se produjo de modo intuitivo y natural, de modo que, al

decir de Carranza (2017), la cartografía de anomalías geoquímicas evolucionó a la cartografía del potencial mineral.

La evaluación de potencial ha sido en gran medida influenciada por cuatro libros, que constituyen hitos miliares en su evolución y desarrollo. El primero, ya mencionado, es el libro de Cox y Singer (1986) “Mineral deposit models”. Los tres siguientes pertenecen a la era de los sistemas de información geográfica y promovieron su uso rutinario en la evaluación de potencial de recursos minerales. El primero de ellos fue el libro de Bonham-Carter (1994) “Geographic Information Systems for geoscientists”. El segundo es el publicado por Guocheng Pan y DeVerle P. Harris (2000) “Information synthesis for mineral exploration” y el tercero por Enmanuel John M. Carranza (2009) “Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS”. El libro de Bonham-Carter ha sido el que mayor influencia ha tenido en el empleo de los SIG en la evaluación de potencial y ha sido citado al menos 1500 veces, en tanto el de Guocheng Pan y DeVerle P. Harris y el de Enmanuel John M. Carranza han sido citados al menos 100 y 260 veces, respectivamente (Carranza, 2017).

De los métodos de cartografía de potencial mineral dirigidos por datos, los más publicados, entre los años 1977 y 2016, son: 1) Pesos de evidencia, 2) Red neural artificial, 3) Regresión logística y 4) Análisis de relación de probabilidad. Entre los métodos dirigidos por el conocimiento, los más publicados entre los años 1990 y 2016 son: 1) Lógica difusa, 2) Superposición indexada [de mapas de evidencia] multiclasas y 3) Funciones de creencia evidencial (Carranza, 2017).

Por su parte, la evaluación del potencial de recursos minerales tuvo en Cuba, desde 1980 hasta 1993, una evolución similar a la registrada en otras partes del mundo, con un retardo temporal de solo algunos años, siguiendo, en gran medida, los avances en la temática alcanzados por la escuela rusa. La integración se

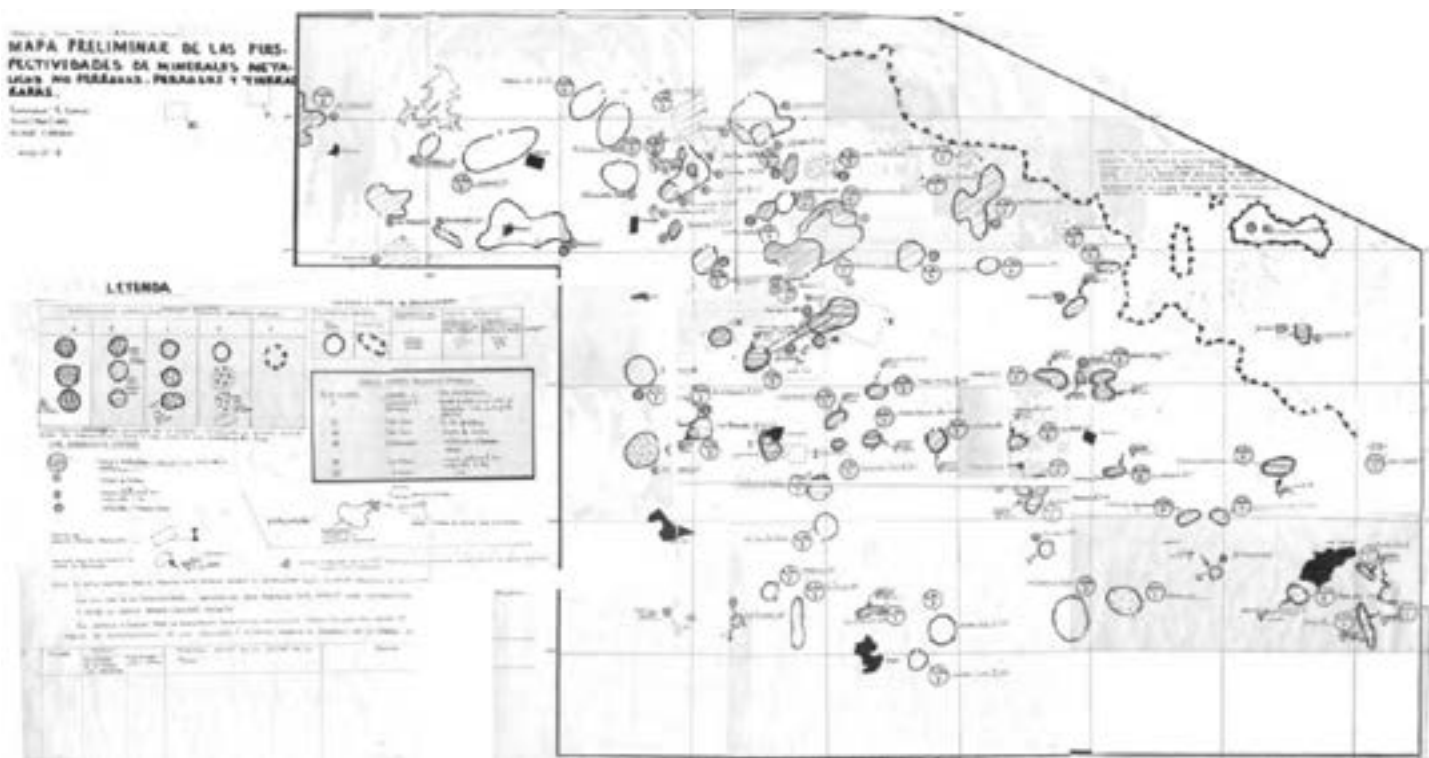
realizaba mediante la superposición de mapas de interpretación compleja geofísicos y geoquímicos sobre el correspondiente mapa geológico. Un ejemplo de mapa de potencial mineral obtenido de esta manera aparece en la figura 1.

En 1998 - 1999, con la introducción de los sistemas de información geográfica, comenzó en Cuba la era de la cartografía digital del potencial mineral, caracterizada en sus inicios por la falta de experiencia de quienes asumieron la responsabilidad de desarrollarla y las limitadas posibilidades que en el campo de la cartografía de potencial mineral ofrecían las

aplicaciones SIG disponibles en el país. Ello se reflejó en el carácter fundamentalmente cualitativo de las mismas, la sencillez del esquema de integración de datos asumido y en la presencia de algunas deficiencias que limitaron su alcance. Un ejemplo de mapa de potencial mineral obtenido en ambiente SIG se muestra en la figura 2.

FIGURA 1.

Mapa de potencial mineral preliminar Siboney Las Tunas, del Proyecto Tema 401-07 Evaluación de Potencial Siboney Las Tunas (López Kramer et al., 1993). IGP



Desde esa fecha (1998) hasta la actualidad, las evaluaciones de potencial realizadas en el país se han centrado fundamentalmente, en los recursos de Au, Ag y metales base, aunque también se han realizado para rocas y minerales industriales (grava y arena) y energéticos (asfaltitas, rocas bituminosas y geotermia), demostrando que la efectividad de este tipo de investigación no está confinada al ámbito de los recursos minerales metálicos.

En este período, la evaluación del potencial basada en SIG en Cuba se ha caracterizado

por un muy variable uso de la teledetección, desde intensivo hasta nulo. De igual modo han sido comunes las limitaciones en el empleo más adecuado de la información tectónica disponible y la obtención de nuevos datos de este tipo.

Una limitación común a todas las evaluaciones de potencial realizadas en Cuba hasta el momento, se relaciona con la baja calidad de los datos geoquímicos disponibles y con la heterogeneidad de los medios geoquímicos muestreados (sedimentos de corriente, suelo,

rocas), así como de las técnicas de laboratorio utilizadas (cuantitativas y semicuantitativas).

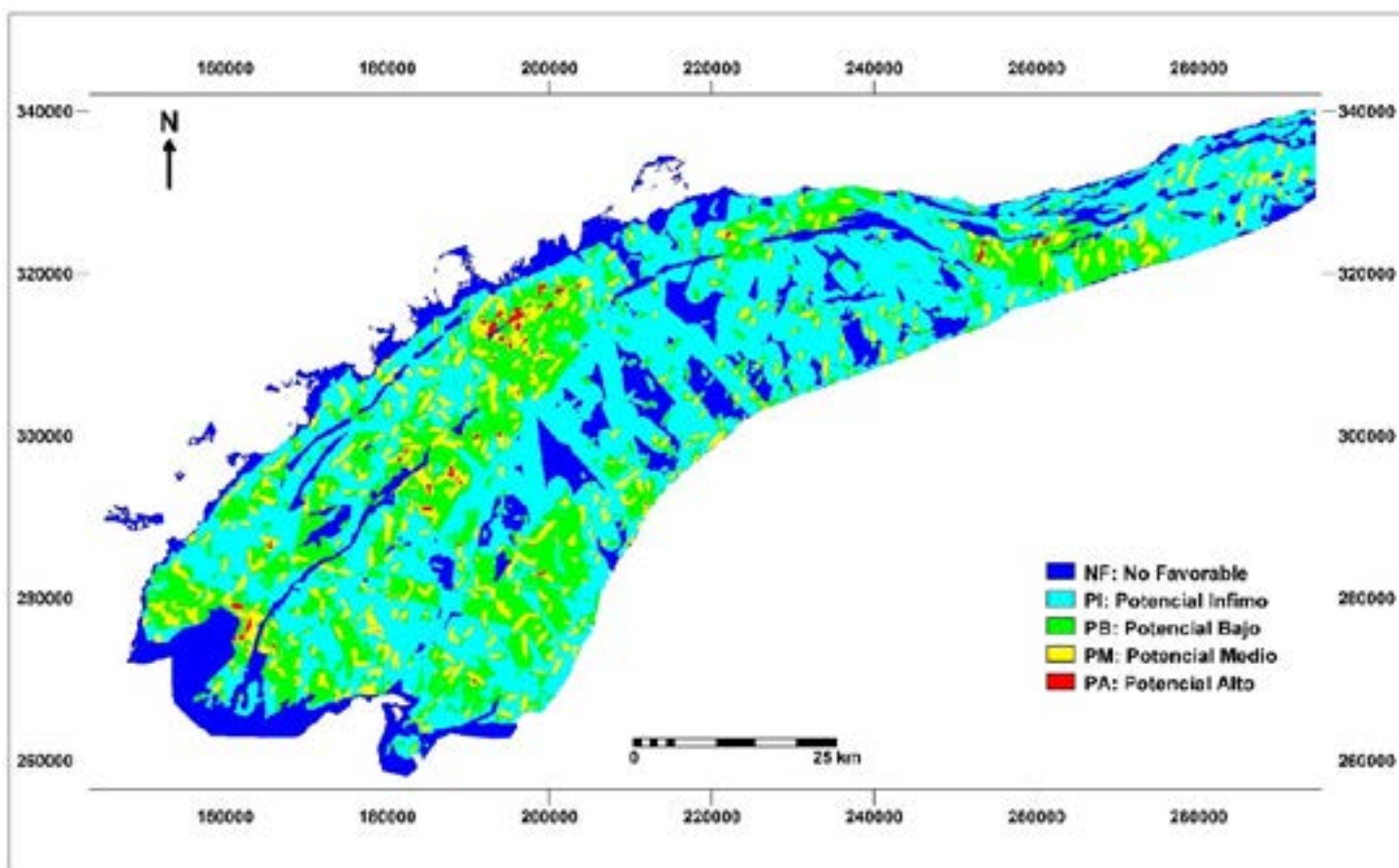
Mientras la evaluación de potencial de recursos minerales realizada antes de 1991 se basó en la adquisición de grandes volúmenes de información primaria mediante trabajos de campo de diversos tipos, la llevada a cabo a partir de 1998 fue dominada por el uso de la información pretérita disponible, con muy escasos o ningún trabajo de campo asociado. Esto, más que reflejar una diferencia metodológica, responde a la gran diferencia de disponibilidad de recursos materiales, humanos y

financieros que distingue a lo que va del siglo XXI del período 1970 – 1990.

La mayoría de las evaluaciones de potencial realizadas en Cuba antes y después de 1990 son completas, es decir, incluyen tanto la parte cualitativa como la cuantitativa de la evaluación de potencial.

FIGURA 2.

Mapa de potencial mineral para depósitos ciegos de sulfuros (Torres Zafra, 2006). IGP



Metodología

Dada la complejidad de la temática a abordar, a la hora de confeccionar la guía metodológica se prefirió desarrollar un documento más amplio e informativo, debido, en primer lugar, a la existencia de diversas variantes metodológicas, todas válidas, dentro de la metodología general de la evaluación de potencial de recursos minerales y, en segundo lugar, a la

necesidad de divulgar de un modo más amplio y abarcador las interioridades del trabajo a realizar por aquellos especialistas que se dediquen a esta temática, así como generar un nivel más adecuado de comprensión acerca de las exigencias cognoscitivas que en materia de geociencias y otras ciencias relacionadas han de cubrir la preparación de geólogos de nivel superior en las universidades cubanas,

en particular, aquellos que se dediquen a la investigación en esta y en otras líneas de trabajo afines dentro de la Geología.

Debido a que se trató de un trabajo esencialmente basado en la consulta bibliográfica y en la experiencia propia acumulada por el autor y otros especialistas cubanos, la metodología aplicada fue bastante simple y consistió en la ejecución de los siguientes pasos:

1. Búsqueda y recopilación de literatura internacional sobre el tema. Se revisó la literatura internacional especializada disponible, sobre todo lo relacionado con la evaluación de potencial, principalmente desde el punto de vista de la metodología de su ejecución. En este sentido fue recopilado un importante volumen de literatura mediante el uso de Internet.

2. Sistematización y generalización de la literatura recopilada y consultada. Para la redacción de las diferentes partes de la guía metodológica fueron utilizadas diversas fuentes bibliográficas, de manera que unas verificaban y/o precisaban lo planteado en otras o permitían ampliar con información complementaria el tema tratado.

3. Redacción de la guía metodológica. La redacción general se llevó a cabo de modo secuencial, comenzando por lo relacionado con el proyecto de evaluación de potencial y terminando con la redacción del informe, luego de transitar por todo los pasos de la evaluación cualitativa y cuantitativa del potencial de recursos minerales. Al hacerlo, además de recoger la experiencia internacional existente al respecto, se plasmó la acumulada por los especialistas cubanos que han trabajado esta línea de trabajo dentro de las ciencias geológicas.

La guía metodológica para la evaluación de potencial de recursos minerales en Cuba consta de 70 páginas y va acompañada por tres anexos textuales, con un total de 36 páginas. La misma abarca la fase cualitativa (cartografía del potencial mineral) y la cuantitativa (estimación de los recursos no identificados de mena, componente útil o materia prima hasta la profundidad límite de estudio) de la evalua-

ción de potencial de recursos minerales, abordando los siguientes temas:

- Principios generales de la evaluación de potencial. Términos y definiciones fundamentales. Rasgos generales de la evaluación de potencial.

- Adquisición y preparación inicial de los datos. Etapa de proyecto. Análisis de antecedentes. Modelación de depósitos minerales y/o sistemas minerales. Obtención de la información espacial georreferenciada. Confección de mapas de evidencia.

- Modelos predictivos de exploración mineral. Generalidades. Diseño del modelo predictivo. Condiciones a cumplir por los mapas de evidencia.

- Superposición indexada de mapas multiclases. Introducción. Secuencia de ejecución. Determinación de las clases y sus valores. Determinación de los pesos de los mapas de evidencia.

- Integración de mapas de evidencia mediante lógica difusa. Introducción. Lógica Booleana. Lógica difusa.

- Control de la calidad de la evaluación de potencial.

- Terminación de los mapas de potencial mineral.

- Evaluación cuantitativa del potencial de recursos minerales. Determinación de la profundidad real de investigación. Métodos de determinación cuantitativa del potencial de recursos minerales. El “Método de las Tres Partes”.

- Informes de evaluación de potencial de recursos minerales. Generalidades. Cuerpo del informe. Anexos textuales y digitales. Anexos gráficos. Conservación de los materiales.

- Bibliografía.

Esta guía metodológica va acompañada por 3 anexos textuales. El primero trata sobre el contenido de los catálogos a confeccionar como anexos digitales de un informe de evaluación de potencial de recursos minerales (catálogo general de pozos, catálogo de ocu-

rrencias minerales y catálogo de muestras de campo). El segundo versa sobre algunos métodos geo-matemáticos empleados en la modelación predictiva del potencial mineral y el tercero, por su parte, ofrece un listado de fuentes bibliográficas, organizada por método y por forma de aplicación (dirigida por datos, dirigida por el conocimiento e híbrido), sobre los distintos métodos geo-matemáticos de integración empleados en la modelación predictiva para la cartografía del potencial mineral.

Rasgos generales de la evaluación de potencial

En la base de la evaluación del potencial de recursos minerales se encuentra la aplicación de la Matemática en la Geología, en particular de la Estadística (tanto la univariada como la multivariada), la Teoría de Conjuntos y la Lógica Matemática, siempre acompañada por la utilización de las máquinas cibernéticas, las que hacen posibles los voluminosos cálculos derivados del uso de algoritmos complejos y grandes cantidades de datos primarios iniciales. El proceso de su realización puede ser caracterizado, en general, mediante cierto número de principios, paradigmas y axiomas:

El resultado de una evaluación de potencial es fruto del trabajo conjunto del hombre y la máquina. La realización de evaluación de potencial asentada sobre sólidas bases matemáticas no es posible sin el empleo de computadoras, dado el gran volumen de datos a manejar y del cálculo involucrado. Así ha sido desde alrededor de 1970, cuando su uso para resolver problemas geológicos comenzó a generalizarse. Mientras el hombre selecciona los datos iniciales, elige el algoritmo a utilizar e interpreta los resultados, la máquina ejecuta la secuencia de operaciones ordenada y todo el volumen de cálculo asociado, un trabajo que de otro modo no podría llevarse a cabo, no por falta del conocimiento necesario, sino por la cantidad de personal y el tiempo requerido para hacerlo por vía manual.

Los conjuntos de datos iniciales a utilizar deben estar libres de errores y de influencias ajenas a las relacionadas con el problema a resolver. Esto significa que los datos no solo deben estar libre

de los errores humanos cometidos durante su registro e introducción, sino también de aquellas influencias sistemáticas introducidas por otros factores geológicos no asociados con los objetos geológicos (depósitos minerales) de interés. Mientras lo primero se consigue mediante el control de la calidad del proceso de obtención de los datos primarios y la validación de los datos introducidos, lo segundo se logra, en primera instancia, mediante la introducción de correcciones a los datos primarios (muy comunes en geofísica) y en segunda instancia, mediante la exploración de los datos y otros procesamientos estadísticos o geoestadísticos. De esta manera, la variabilidad presente en los conjuntos de datos a utilizar solo responderá, en gran medida, a la variabilidad del medio geológico objeto de estudio relacionada con la presencia de depósitos minerales y con el problema a resolver.

Homogeneidad de los datos. Este principio se deriva del principio científico general de la repetitividad de los resultados experimentales en igualdad de condiciones, lo cual presupone el cumplimiento del principio de igualdad de todas las condiciones bajo las cuales se ejecuta el experimento. Trasladado al ámbito de la Geología, esto significa que todos los datos de un mismo tipo (tema) deben ser adquiridos en las mismas condiciones de toma de muestra, de preparación de la muestra, de análisis de la muestra, o en iguales condiciones de medición, de procedimiento y con el mismo equipamiento en el caso de los datos obtenidos in situ. Esto es lo que garantiza la repetitividad de los resultados en las geociencias, hace posible el control de su calidad y la obtención de resultados no sesgados.

La evaluación de potencial siempre se realiza con datos incompletos. Esta es una realidad para todas las ramas de la Geología y se debe a las limitaciones físicas de acceso a las rocas impuestas por su múltiple diversidad de condiciones de yacencia y de distribución espacial, a las que se añaden limitaciones de orden técnico - material y económicas. Por ello, la distribución espacial de los datos adquiridos de diversos tipos suele ser desigual y más o menos irregular, a lo que en ocasiones se añade la falta de completamiento de

determinados tipos de datos (ausencia de resultados correspondientes a uno o varios parámetros en cierto número de puntos de adquisición de datos). Cabe señalar aquí, que si bien existen algunos métodos matemáticos muy potentes utilizables en la evaluación de potencial, estos requieren de un alto grado de completamiento y/o regularidad en la distribución espacial de los datos, condiciones que rara vez se logran en las investigaciones geológicas. Por esta razón, en la evaluación de potencial se emplean algoritmos basados en el método de analogía y reconocimiento de patrones que permiten su aplicación, dentro de ciertos límites, a conjuntos de datos más o menos incompletos e irregularmente distribuidos. Como consecuencia final de todo esto, se tiene que los resultados de cualquier evaluación de potencial contienen siempre un margen, mayor o menor, de incertidumbre.

La computadora no razona, solo ejecuta al pie de la letra y a gran velocidad lo que se le ordena hacer. La máquina trabaja a ciegas, aplicando las órdenes que se le imparten al conjunto de datos que se le indica procesar, sin importar si los datos contienen o no errores y si el resultado obtenido tiene o no alguna clase de sentido.

Los datos basura conducen a resultados basuras: Este axioma se deriva de lo arriba expuesto. Si los datos introducidos no tienen la calidad requerida, el resultado de su procesamiento tampoco responderá a las exigencias planteadas. Dicho de otro modo, la calidad del resultado de una evaluación de potencial responde en primer término a la calidad de los datos iniciales introducidos.

Distinción entre conocimiento de utilización y conocimiento de comprensión. El conocimiento de utilización es aquel que se limita a saber cuáles botones o comandos usar para que se ejecute una determinada operación, mientras el conocimiento de comprensión es el que incluye el entendimiento del algoritmo que se ejecuta y su fundamento científico, es decir, el que, además de brindar respuesta al ¿qué hace?, responde al ¿por qué y cómo lo hace? La diferencia entre ambos tipos de conocimientos radica en el grado de capacidad que concede a la persona para tomar

decisiones y llevar a cabo acciones sólidamente argumentadas. En consecuencia, un buen especialista en evaluación de potencial debe tener un adecuado nivel de conocimiento de comprensión acerca del funcionamiento de las aplicaciones que utiliza en su trabajo (desde el punto de vista geocientífico, no necesariamente informático o cibernético).

La máquina tiene hacer lo que el hombre desea. Hay ocasiones en que una aplicación (software), por una u otra causa, no hace con exactitud lo que se espera al realizar alguna operación particular. En ese caso, el especialista (geocientífico) se ve obligado a “darle la vuelta” para conseguir, bien mediante el auxilio de otros comandos o de otras aplicaciones, que la máquina haga exactamente lo que pretende hacer.

La evaluación de potencial es una especialidad holística. Ella se caracteriza por el amplio uso de la sistematización, análisis, generalización e integración de grandes volúmenes de información temática (geológica, geoquímica, geofísica), obtenida por diferentes medios (terrestres, marinos, aéreos, cósmicos). En consecuencia, el especialista en evaluación de potencial tiene que poseer una formación de amplio espectro, de tipo holístico, en el campo de la Geología y ciencias afines, que lo haga capaz de utilizar e interpretar de modo adecuado los diversos tipos de información que emplea en su trabajo. Esto implica, entre otras cosas, trabajar con los modelos descriptivo – genéticos de depósitos minerales y personalizar estos para el territorio objeto de estudio, identificar las regularidades que gobiernan la distribución de los depósitos minerales en diferentes ambientes y condiciones geológicas y, en consecuencia, identificar las evidencias a utilizar en la evaluación de potencial; conocer las posibilidades y limitaciones de cada una de las fuentes de información (métodos) a emplear e interpretar los resultados aportados por cada una de ellas; lograr que los distintos conjuntos de datos cumplan todas las condiciones necesarias para su posterior integración y dominar las herramientas informáticas y metodológicas propias de la evaluación de potencial y el fundamento científico que sustenta su aplicación.

Casualidad y causalidad. Dado que cada evidencia responde a un rasgo, característica o regularidad propia de un cierto tipo de depósito mineral, mientras más evidencias estén disponibles, más potente se vuelve la aplicación del método de la analogía. Esto significa que mientras la presencia de un rasgo común en varios objetos geológicos puede deberse en gran medida a la casualidad, al incrementarse el número de rasgos comunes (de índices, criterios, y por tanto de evidencias) la componente casual es sustituida cada vez en mayor grado por la causal, es decir, mientras la presencia de una o dos evidencias en un área dada puede ser fruto de la casualidad, la presencia simultánea de cinco, seis o más evidencias obedece enteramente a la causalidad. Dicho de otro modo, implica que mientras mayor sea el número de evidencias utilizadas, más rigurosa resulta la aplicación del método de analogía, base de la evaluación de potencial. Esto es un hecho fundamental, porque el principio de la causalidad, junto con el de la repetitividad de los resultados en igualdad de condiciones, constituye uno de los pilares que definen a la Ciencia. En términos prácticos lo anterior se traduce en que los geocientíficos, a la hora de abordar una evaluación de potencial, tratan de disponer del mayor número posible de evidencias para llevarla a cabo.

Flexibilidad metodológica. Aunque a la cartografía de potencial de recursos minerales le es propia una metodología general de realización que incluye los siguientes pasos: a) identificación de los criterios de reconocimiento de la mineralización de interés, b) preparación y estructuración de los datos, c) elaboración de mapas monotemáticos y d) combinación de mapas en una red de inferencia apropiada, hay varias formas de realizar el último paso mencionado (el d), lo cual se debe en primer lugar a la disponibilidad de variados métodos matemáticos aplicables en este ámbito de la actividad geocientífica, tales como la lógica booleana, lógica difusa, red neural artificial, funciones de creencia evidencial, análisis discriminante, análisis característico (receptor operador característico), análisis de relaciones de vecindad, máquina de patrocino de vectores, análisis de favorabilidad, análisis de relación de probabilidad, regresión logística, bosque aleatorio, superposición indexada binaria y multiclase

de mapas de evidencia, pesos de evidencia, red bayesiana de clasificadores (Carranza, 2017). La “red de inferencia apropiada”, es decir, el modelo predictivo o de integración, puede incluir el empleo de más de uno de los métodos antes mencionados. Dicho de otro modo, como se plantea en el reglamento metodológico ruso para levantamientos geológicos a escala 1:50 000 (Kumpan, 1986): “la gran diversidad de procesos y objetos abarcados por la Geología condiciona la inexistencia de una correspondencia unívoca entre la gran diversidad de problemas geológicos y el conjunto de procedimientos matemáticos aptos para resolverlos”. Esto también es válido para la evaluación cuantitativa del potencial mineral, pues hay disponibles varios procedimientos metodológicos, todos igualmente válidos, para realizar esta otra parte de la evaluación de potencial de recursos minerales.

Carácter universal y concreto de la metodología de evaluación de potencial. La metodología de la evaluación del potencial de recursos minerales es universal, aplicable a cualquier mineralización metálica o no metálica, e incluso a recursos energéticos. Lo que cambia, en función del tipo de mineralización a evaluar, son las evidencias a utilizar y la forma en que estas son integradas, es decir, que si se va a evaluar el potencial para gossan de Au y Ag, las evidencias a utilizar son las apropiadas para ese tipo de depósito y la forma de integrarlas ha de reflejar las relaciones entre los correspondientes índices y criterios de prospección para esa clase de mineralización. Así, mientras la metodología es universal, su aplicación es concreta para cada caso particular.

Libertad en el uso de aplicaciones. Desde el punto de vista metodológico el uso de una determinada aplicación SIG (propietario o libre) no es requerido, pues es suficiente el uso de cualquier aplicación de este tipo que disponga de las herramientas y capacidades necesarias para la realización de la evaluación de potencial. Tampoco es requerido llevarlos todos a cabo en una sola aplicación, pues estas pueden implementarse a través del empleo de varias de ellas, con la única condición de seguir la secuencia metodológica de los trabajos. Sin

embargo, por motivos de economía e independencia tecnológica, se recomienda el uso de aplicaciones SIG de software libre y de código abierto, como el Quantum GIS y el ILWIS.

Forma de ejecución y escala. Hay dos modos u formas de llevar a cabo una evaluación de potencial. 1) Pasiva: Basada en la manipulación y reinterpretación de datos disponibles, con muy escasa o ninguna adquisición de datos propios. Un caso particular de esta variante es la que incluye el uso de escenas de sensores remotos ya disponibles como medio de adquisición, mediante su procesamiento e interpretación, de nuevos datos. 2) Activa. Se basa no solo en el empleo de la información pretérita disponible, sino también en la realización de importantes volúmenes de trabajos de campo para la adquisición de nuevos datos, con el fin de ampliar el universo de evidencias utilizable. Por su escala, la evaluación de potencial puede realizarse a escalas pequeñas (para países de gran extensión territorial y partes de continentes) y a escalas medias (1:250 000 a 1:25 000) para territorios de tamaño más restringido.

División en dos fases de la evaluación de potencial de recursos minerales. La evaluación de potencial de recursos minerales se divide en dos fases o etapas: 1) Evaluación cualitativa y 2) Evaluación cuantitativa. La primera de estas fases o etapas se corresponde con lo que en la literatura se denomina “cartografía del potencial mineral” y su resultado es la obtención de uno o varios mapas de favorabilidad (probabilidad), en los que se identifican y delimitan las áreas más perspectivas (más favorables) para el hallazgo de depósitos minerales aun no descubiertos dentro del territorio sometido a estudio. La segunda corresponde a la estimación cuantitativa, por diversos métodos, del volumen de recursos minerales que puede existir y ser encontrado en el territorio objeto de estudio hasta una profundidad previamente elegida o determinada. Su resultado es la estimación de los recursos no identificados existente dentro del mencionado territorio. Lo anterior implica que toda evaluación cuantitativa de potencial requiere para su realización de una evaluación cualitativa previa.

Así, en el método de las tres partes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), la primera parte corresponde metodológicamente a la fase cuantitativa de la evaluación de potencial y las otras dos a la cuantitativa. Igualmente significa que no toda evaluación de potencial concluye necesariamente con una evaluación cuantitativa de los recursos minerales no identificados y la evaluación de la riqueza mineral del territorio objeto de estudio. De hecho, muchas de ellas se limitan a la identificación de nuevas áreas objetivos para la exploración, es decir, a la cartografía de potencial. Sin embargo, una evaluación de potencial de recursos minerales completa desde el punto de vista metodológico ha de incluir ambas fases.

Uso de los modelos de depósitos minerales y sistemas minerales

La identificación del tipo o tipos (modelos) de depósito mineral presentes en el territorio objeto de estudio es de gran importancia en la evaluación de potencial por dos motivos fundamentales:

- La evaluación de potencial se lleva a cabo por modelo de depósito, es decir, se generan tantos modelos predictivos (de integración) y mapas de potencial mineral como modelos de depósito son objeto de evaluación, lo cual también se extiende ulteriormente a la parte cuantitativa del proceso.
- El modelo de depósito define el conjunto de índices y criterios de exploración y, en consecuencia, el conjunto asociado de evidencias, y finalmente, en conjunción con los tipos y la calidad de los datos disponibles, el conjunto de evidencias a cartografiar e integrar.

En sentido general, a la hora de confeccionar un modelo de depósito mineral, resulta necesario distinguir entre atributos esenciales (críticos) y triviales (incidentales). Esto se consigue a través del uso de conceptos genéticos, más o menos elaborados, que reflejan el grado de conocimiento disponible sobre la génesis de la clase de depósitos considerada. Este conocimiento refleja

los resultados alcanzados a través de años de esfuerzos realizados en la investigación geológica fundamental.

Una característica del proceso de modelación de depósitos minerales es el carácter asintótico de la aproximación a la compresión total del modelo. Ello implica que todo modelo presenta un nivel de inexactitud que lo diferencia del modelo verdadero del tipo de depósito considerado, lo cual condiciona la subdivisión de ambos tipos de modelos antes mencionados en dos clases:

Generales: son modelos generalizados, los cuales se construyen de modo que sus atributos sean independientes del sitio específico donde se encuentran, de manera que ellos puedan ser transferidos de un depósito a otro sin importar el lugar del mundo donde se realice la evaluación de potencial. Esta clase de modelos es la que aparece en las grandes compilaciones de modelos publicadas en la literatura especializada internacional.

Locales o robustecidos: son modelos, muchas veces derivados de los anteriores, que especifican el comportamiento observado en el territorio objeto de estudio de algunos de los atributos del modelo general de partida, los que además pueden incorporar otros rasgos comunes a un tipo de depósito dado observados en el territorio a estudiar. Esta clase de modelo es el que, por lo general, se usa en las evaluaciones de potencial, suele encontrarse en los casos de estudio publicados y, como su nombre indica, su grado de aplicabilidad depende del área geológica objeto de estudio.

La diferencia fundamental entre modelos de depósitos y de sistemas minerales estriba en que el segundo usualmente reúne a varios tipos (modelos) de depósitos minerales relacionados en-

tre sí espacial y genéticamente, de modo que se trata de un sistema de un orden jerárquico superior, por lo que a la hora de modelarlo, se comienza por la identificación de los rasgos y procesos geológicos que caracterizan al sistema mineral como un todo, derivándose de ellos los correspondientes índices y criterios de exploración, a partir de los cuales se procede a identificar las evidencias y a seleccionar aquellas que van a ser cartografiadas. De este modo, el procedimiento para la confección de un modelo de sistema mineral es, en sentido general, similar al aplicado para los modelos de depósitos minerales.

La modelación de sistemas minerales se realiza para el territorio objeto de estudio y, por lo tanto, el resultado obtenido es siempre un modelo local que enfatiza las características que presenta el sistema mineral en el territorio sometido a evaluación. Aunque en principio se considera posible desarrollar modelos generales de sistemas minerales, no ha sido esa, hasta ahora, la práctica internacional. Ello probablemente responde al hecho de que muchos rasgos de un sistema mineral dado dependen, en considerable medida, de la historia geológica particular del territorio objeto de estudio.

Finalmente, se tiene que una cartografía de potencial mineral puede llevarse a cabo por uno u otro tipo de modelación o empleando ambos. En este último caso es posible llevar a cabo el análisis comparativo entre los diferentes mapas de potencial mineral obtenidos.

CONCLUSIONES

1. Hasta 1985 el desarrollo alcanzado en la evaluación de potencial por la escuela geológica soviética y la occidental fue similar. La crisis económico – política que acompañó a la desaparición del socialismo y a la desintegración de la URSS, frenó el desarrollo de la temática en Rusia y otros países de Europa oriental y Asia central durante la última década del siglo XX. Una afectación similar se observó en Cuba, donde se rompió durante alrededor de 8 años, la continuidad de este tipo de trabajo.

2. La evaluación del potencial de recursos minerales, aunque le es implícita una metodología general única, se caracteriza por su flexibilidad metodológica, derivada de la aplicación de diferentes métodos geo-matemáticos de integración disponibles a la resolución del problema científico que ella aborda a través de la aplicación de diversos modelos predictivos diseñados al efecto. De igual modo, existen varias formas de realizar la estimación cuantitativa del potencial de recursos aún no descubiertos, todas igualmente válidas.

3. La metodología de la evaluación de potencial de recursos minerales parte del principio de la analogía y se fundamenta en los principios de la causalidad, la repetitividad de los resultados en igualdad de condiciones y de máxima objetividad posible de los datos iniciales.

4. La aplicabilidad de los métodos y procedimientos de la evaluación de potencial al pronóstico de cualquier clase de recurso geológico, sea este de minerales metálicos, de rocas y minerales industriales o energético, constituye un reflejo de la unidad de la Geología como disciplina científica y de su objeto de estudio.

5. Los modelos de depósito, en particular los locales, son fundamentales para toda evaluación de potencial, por cuanto ellos definen las evidencias a utilizar y las relaciones mutuas existentes entre ellas.

CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario, Canada. Editorial Pergamon. 164 p.
- Carranza, E. J. M. (2009). *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Amsterdam. Editorial Elsevier. 347 p.
- Carranza, E. J. M. (2017). *Natural Resources Research Publications on Geochemical Anomaly and Mineral Potential Mapping, and Introduction to the Special Issue of Papers in These Fields*. *Natural Resources Research*, 26 (4): 379 - 410.
- Cox, D. P. & Singer, D. A., eds. (1986). *Mineral deposit model*. U.S. Geological Survey Bulletin 1693. Washington. United States government printing office. 379 p.
- Eckstrand, O. R., ed. (1984). *Canadian mineral deposit types, a geological synopsis*: Geological Survey of Canada. *Economic Geology Report* . 36: 1 - 86.
- Kilby, W. E. (2004). *The British Columbia Mineral potential project 1992-1997. Methodology and results*. GeoFile 2004-2. British Columbia, Canada: Mining and Mineral Division, Geological Survey and Development Branch, Ministry of Energy and Mines. 324 págs.
- Kumpan, A. S., Astajov V. I., Budko V. M., Burde A. I., Vasilieva V. I., Voznesensky V. D., et al. (1986). Capítulo IX. *Reglamento metodológico para levantamientos geológicos a escala 1:50 000*. Tomo II. Moscú. Editorial Veneshorgizdat Págs. 432 - 468.
- López - Kramer, J. M., et al. (1993). *Informe del Tema 401-09, Evaluación pronóstica de la mineralización aurífera de Cuba, para el mapa metalogénico pronóstico, a escala 1:500 000*. Archivo del Instituto de Geología y Paleontología (IGP). Inédito, IGP. La Habana, Cuba.
- Pan, G. C., Harris D. P. (2000). *Information synthesis for mineral exploration*. New York: Oxford University Press Inc.
- Singer, D. A. (2007). *Short Course Introduction to Quantitative Mineral Resource Assessments*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1434. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1434/>.
- Torres - Zafra, J. L., 2006. *Regularidades metalogénicas de las secuencias ricas en materia orgánica del terreno Guaniguanico. Evaluación de su potencial polimetálico - precioso*. Tesis de Maestría, Facultad de Geología y Mecánica, Universidad Hermanos Saínz Montes de Oca. Pinar del Río.
- Wilson A.C., Rowell D.J. Seim G. W. and Debicki R.L. (2008). *Procedural Guidelines for Provincially Significant Mineral Potential Mineral Resource Assessments*. Ontario. Canada. Geological Survey Open File Report 6141. 91 p.