

MODELOS DE YACIMIENTOS MINERALES: TIPOLOGÍAS Y APLICACIONES

ORE DEPOSIT MODELS: TYPOLOGIES AND APPLICATIONS

JOSÉ D. ARIOS A IZNAGA
ROBERTO DÍAZ MARTÍNEZ

E-mail: jariosa@ri.uo.edu.cu
Universidad de Oriente

Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez

RESUMEN: En los últimos treinta años se han publicado numerosos trabajos relacionados con los modelos de yacimientos minerales, la mayoría de los cuales han sido elaborados por especialistas norteamericanos y canadienses. La elaboración de un tipo de modelo (geológico, estadístico, económico, ley-tonelaje) para un yacimiento mineral dado es de gran importancia para los geólogos prospectores, ya que sirve de guía para descubrir, estudiar y evaluar el mismo. El presente artículo de revisión recoge y generaliza los aspectos esenciales que hay que tener en consideración para definir los modelos de yacimientos minerales. Se brindan los aspectos esenciales de la conceptualización de los modelos, partiendo de un análisis profundo de las diferentes clasificaciones de los yacimientos minerales. Por último, en el trabajo se expone una clasificación tipológica de los modelos válida para ser utilizada en los trabajos de prospección y exploración de yacimientos, tanto en Cuba como en el resto del mundo.

Palabras clave: Modelos, yacimientos minerales, clasificación tipológica, prospección.

ABSTRACT: In the last 30 years several works related with the models of mineral locations have been published, most of which have been elaborated by North American and Canadian specialists. The elaboration of model's type for a given mineral location is of great importance for the geologists prospectors, they serve as guide to discover, to study and to evaluate the same ones. The present article generalizes essential aspects that should be considered to define the models of ore deposits. The essential aspects of the conceptualisation of the pattern are offered leaving of an analysis of different classifications of the ore deposits. Lastly, in the work a typological classification is exposed from the valid models to be used in the prospecting works and exploration of ore deposits, as much in Cuba as in the rest of the world.

Key words: Model, ore deposit, typological classification, prospecting.

INTRODUCCIÓN

En 1919, Bateman señaló que la localización espacial de las menas no está sujeta a la casualidad, sino que ellas son el resultado de procesos geológicos que operaron bajo ciertas condiciones en el interior de la corteza terrestre.

Los yacimientos minerales son concentraciones naturales de uno o más minerales; surgen como consecuencia de varios procesos geológicos que han operado en un amplio rango de escenarios geológicos. Dentro de un ambiente geológico específico o en varios ambientes relacionados entre sí y bajo condiciones similares de temperatura, presión, estructuras que favorezcan el flujo de los fluidos meníferos, disponibilidad de fuentes metalíferas, etc., un proceso particular o la combinación de varios procesos pueden originar concentraciones minerales de características similares (Eckstrand *et al.*, 1996).

La concentración de uno o varios elementos meníferos durante un proceso específico o durante la combinación de varios procesos, ocurre cuando estos elementos están disponibles en dicho ambiente y tienen propiedades geoquímicas similares.

La mayoría de los procesos geológicos son recurrentes a través de la historia geológica del planeta; por tanto, no es sorprendente que yacimientos minerales con características geológicas y mineralizaciones similares estén presentes en ambientes semejantes localizados en distintas partes del mundo y en rocas de diferentes edades. Los yacimientos minerales que son parecidos en ese sentido, se denominan *tipo de yacimiento mineral*. Eckstrand *et al.* (1996) aporta la definición siguiente: "un tipo de yacimiento mineral es un término colectivo para yacimientos minerales que comparten una serie de atributos geológico y contienen un mineral particular o una combinación de ellos, de manera tal que estas dos características lo distinguen de otros tipos de yacimientos minerales".

A partir de esta definición emergen dos corolarios:

1. Los yacimientos minerales de un mismo tipo se supone que tengan una génesis similar o común.
2. Las asociaciones de rocas que contienen los atributos geológicos que son característicos de un tipo particular de yacimiento mineral tienen el mejor potencial para contener a los yacimientos de ese tipo.

El concepto de tipo de yacimiento tiene gran importancia para los geólogos relacionados con la génesis de los yacimientos minerales y esto se debe a que la definición es un resumen conveniente de los principales atributos que cualquier teoría debe explicar.

El segundo corolario se puede formular también a partir de la definición de las formaciones meníferas, que son tipos de rocas a las cuales se asocian con vínculos genéticos y paragenéticos tipos específicos de yacimientos minerales y que está en la base del pensamiento de la escuela rusa (Kotliar, 1970; Smirnov, 1982; Siniakov, 1987).

De esta manera, el conocimiento de las clases de rocas y estructuras así como de los ambientes tectónico, sedimentario y magmático que tipifican a ciertos yacimientos minerales, ayudado por una comprensión clara de su génesis, le permite al geólogo de exploración discriminar las áreas más favorables para contener yacimientos minerales no descubiertos de determinado tipo (Lepin y Ariosa, 1986). La prospección de yacimientos es, ante todo, la revelación de la historia de los procesos geológicos que les dieron origen y la geometría de las áreas donde ellos estuvieron activos. Se ha dicho que las tres principales funciones de un geólogo para la búsqueda de los yacimientos minerales son:

1. La formulación de los modelos de yacimientos
2. La utilización de técnicas para la recolección de datos
3. La evaluación de la información a partir de fuentes múltiples

Este proceso va estrechando gradualmente el área de búsqueda hasta que se realizan las perforaciones que descubren el cuerpo mineral. La cadena de eventos, desde la idea hasta la puesta en producción (Milenbuch, 1978) de la empresa minera, es la siguiente:

1. Elaboración de la idea o concepto geológico
2. Reconocimiento preliminar del campo
3. Evaluación favorable del territorio
4. Disponibilidad de fondos
5. Selección de los objetos para perforar
6. Perforación
7. Definición de los cuerpos minerales
8. Desarrollo del coto minero
9. Facilidades para la producción minera
10. Producción de la empresa minera

El proceso mental por el cual los geólogos tratan de comprender y esclarecer la génesis de los yacimientos minerales se denomina comúnmente como *modelación*, y significa el esfuerzo que realizan los geólogos dedicados a la búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de los yacimientos minerales para comprender y explicar los procesos que permiten conocer los yacimientos minerales y sus relaciones geológicas (Ohle y Bates, 1981).

Los modelos pueden ser simples o complicados, pero en todos los casos deben ser flexibles puesto que con el tiempo se producen nuevos datos y descubrimientos, y el geólogo debe estar preparado para transformarlos en concepto o para cambiar la idea sostenida hasta entonces.

El acogerse a una nueva idea no debe provocar una pérdida de objetividad y de valor de los nuevos datos. Un modelo debe ser dinámico, un esquema creciente de ideas que nunca son totalmente correctas, pero que de continuo están más en concordancia con la historia geológica actual del yacimiento. A medida que el modelo mejora, también lo hace la posibilidad de que la exploración sea exitosa.

Hace más de cien años, Chamberlain (1897) señaló que el desarrollo de múltiples hipótesis, permite tener una visión de cada explicación racional del fenómeno a mano y desarrollar cada hipótesis posible en relación con su naturaleza, causa u origen, y dar a todas ellas, de la manera más imparcial posible, una forma de trabajo y un lugar adecuado en la investigación. El investigador (en este caso el geólogo) se convierte en el padre de una familia de hipótesis y por esta relación es moralmente inaceptable brindar más preferencia a una que a otra.

La exploración de minerales es una actividad altamente costosa y creativa; además de los medios tecnológicos que requiere, ella descansa, en gran medida, en la adquisición y uso de información geológica hasta factores económicos y sociopolíticos que influyen en el proceso de la exploración. Su efectividad depende de las decisiones basadas en la integración de un rango de información. Además de esto, se erige el concepto de *modelos* como paradigmas que actúan como herramientas para asistir al procesamiento humano de la información (Henley y Berger, 1993).

El término *modelo* también está asociado comúnmente, de alguna manera, con grupos diferentes de yacimientos, en forma similar que el término *tipos* que se acerca casi al concepto de *modelo descriptivo* (Cox y Singer, 1986).

Los *modelos genéticos*, por otro lado, se consideraban importantes facetas de la geología del yacimiento, pero no se utilizan como criterio para la identificación de los yacimientos minerales. Esto se debe a que un tipo definido empíricamente, es la base principal sobre la cual se formula un modelo genético.

Comúnmente sucede que una pequeña adición de nueva información empírica o la sustracción de otra que ya no sea pertinente para un tipo de yacimiento, puede provocar un cambio total en el modelo genético correspondiente. De esa manera, los modelos genéticos pueden estar vigentes o no en dependencia de las interpretaciones, mientras que los tipos de yacimiento representan bases de datos de información continuamente crecientes. En este sentido un tipo o modelo descriptivo de yacimiento mineral, cuidadosamente definido, es más sólido y posee una expectativa de actualidad más prolongada que su modelo genético correspondiente.

Hay dos componentes en un modelo de yacimientos minerales:

1. El modelo empírico, que consiste en una agrupación de datos que incluyen los obtenidos por la observación y que caracterizan el yacimiento.
2. El modelo conceptual, que intenta interpretar los datos a través de una teoría genética unificadora.

El modelo empírico se desarrolla a partir de la comparación de datos de un gran número de ejemplos del tipo de yacimiento, con la finalidad de establecer los factores geológicos comunes. La selección de los datos habla del juicio de los geólogos pero éstos también pueden estar influenciados por su propia experiencia, lo cual daría como resultado que se enfatice más en una serie de datos que en otra, a expensas de los datos del campo. Este fenómeno es más pronunciado con el desarrollo del modelo conceptual.

El modelo empírico es una base de datos que sirve para construir el modelo conceptual, que intenta proporcionar una interpretación coherente de los eventos involucrados en la formación de un yacimiento mineral, y es, de hecho, un modelo causal, una descripción de los procesos que resultaron en los datos de observación. En el mejor de los casos, el modelo conceptual proporciona sólo una explicación parcial de los datos a partir del hecho de que tales modelos se actualizan y refinan continuamente con nueva información, así como por la reinterpretación de la información anterior a la luz del progreso del conocimiento científico.

El nivel de desarrollo de los modelos de yacimientos minerales, en particular los aspectos conceptuales de los modelos, es muy variable y es ciertamente el reflejo de los esfuerzos acumulados de investigación. Para muchos geólogos de yacimientos minerales y en especial los que se dedican a la exploración, el aspecto más importante del modelo es la descripción de las relaciones temporales entre el tipo de menas y sus relaciones con las rocas encajantes.

No obstante, es necesario tener en consideración las recomendaciones de Hodgson (1993), traducido al castellano por Bustillo y López-Jimeno (1996), cuando indica que al utilizar los modelos de yacimientos minerales se deben tener en cuenta los siguientes *abusos* que con ellos se cometen:

1. El culto por la moda: el último modelo es, siempre y por definición, el mejor. Los modelos anteriores están pasados de moda y no ofrecen ninguna validez.
2. El culto de la panacea: se trata de encontrar el modelo definitivo, que deja arrinconados a los demás, y que, frecuentemente, se obtiene con el uso de una técnica rara que sólo unas pocas personas dominan.
3. El culto de los clásicos: sería la posición contraria al primer abuso, es decir, toda idea nueva es, sistemáticamente, rechazada y sólo los métodos clásicos tienen validez.
4. El culto del corporativismo: por definición sólo unos pocos geólogos, normalmente encuadrados en determinadas escuelas, tienen la capacidad de generar

modelos y avanzar en el conocimiento. El resto, también por definición, está equivocado.

5. El culto de los especialistas: fruto de promover la especialización en aras de una mayor eficiencia. No hay forma de comprobar la validez e interrelación de muchos aspectos de los modelos, pues cada uno de dichos aspectos ha sido generado por un especialista.

Los modelos representan el fundamento científico para la exploración y la evaluación moderna de los yacimientos minerales; ellos vinculan los yacimientos minerales que queremos encontrar y evaluar con la geología que podemos apreciar en el terreno.

Mientras mejor es el modelo, más efectivas son la exploración y la evaluación de los recursos minerales. Los modelos actuales son muy útiles y son esenciales para el descubrimiento y evaluación de los recursos en el siglo XXI y más allá, pero ellos también representan un intento inicial para la sistematización que, por supuesto, siempre podrá ser mejorada. La necesidad de reconocer y distinguir cuáles factores son esenciales y cuáles son fortuitos para la existencia del yacimiento, nos debe estimular a la realización de estudios comparativos críticos de los grupos de yacimientos minerales, utilizando todas las herramientas geológicas, geoquímicas, geofísicas y estadísticas a nuestra disposición (Barton, 1993).

DE LAS CLASIFICACIONES A LOS MODELOS DE YACIMIENTOS

Un modelo es la abstracción de algo; representa algún objeto o actividad que es llamado *entidad* y se utiliza para representar problemas que deben ser resueltos. Existen cuatro tipos de modelos (McLeod, 1993):

Modelos físicos: son una representación tridimensional de una entidad. Se utilizan en el mundo de los negocios e incluyen modelos a escala; los modelos físicos sirven para lograr un propósito que es inalcanzable en el mundo real.

Modelos narrativos: describen la entidad con palabras escritas o habladas. El que escucha o lee puede comprender la entidad a partir de la narración.

Modelos gráficos: representan una entidad con una abstracción de líneas, símbolos o formas. Se utilizan para comunicar información.

Modelos matemáticos: cualquier fórmula o ecuación matemática es un modelo en sí.

Cada uno de ellos puede variar en detalles; en cualquier caso, siempre se hace un esfuerzo por presentar el modelo en una forma simplificada. Una vez que estos modelos simples se comprenden, pueden hacerse más complejos para representar con mayor seguridad sus entidades. Sin embargo, los modelos sólo representan sus entidades y nunca pueden hacerlo de una manera exacta.

Los modelos pueden ser definidos simplemente como una "descripción tentativa de un sistema o teoría que resume todas sus propiedades conocidas o como un patrón preliminar que sirve como un plan a partir del cual se pueda generar lo que no esté confeccionado" (American Heritage Dictionary, 1985).

Para Henley y Berger (1993) el concepto de modelo "es un paradigma mental que actúa como herramienta para asistir al procesamiento humano de información" y finalmente lo definen como "redes de información que han sido construidas para un fin específico".

Los modelos deben reunir cuatro características básicas (McLeod, 1993).

1. Relevancia: cuando la información que proporcionan pertenece, específicamente, al problema que se debe presentar.
2. Seguridad y confiabilidad: que significa que la información se puede utilizar con toda certidumbre.
3. Temporalidad: la información debe estar disponible para solucionar un problema en el momento necesario.
4. Plenitud: la información del modelo debe ser capaz de presentar un cuadro lo más completo posible del problema, asunto o entidad que refleja.

En un trabajo presentado en el Primer Forum McKelvey de Recursos Minerales (Ludington *et al.*, 1985) se señala:

Cada uno de nosotros piensa en algo en específico, cuando escucha la palabra "modelo" [...] haremos una definición de la palabra orientada geológicamente, de forma tal que todos podamos estar de acuerdo en lo que estamos diciendo. Es suficientemente interesante conocer que el diccionario no es muy útil en este problema, indicándonos cuán rápido está cambiando el lenguaje en los campos tecnológicos. Una parte importante de la mayoría de las definiciones da la idea de que el objeto en sí mismo no está disponible para el examen, estudio o uso directo y que el modelo se utiliza en su lugar. También es importante la idea que un modelo puede representar muchos objetos diferentes tangibles y el mismo puede no ser tangible.

Para nuestros propósitos definimos un modelo de yacimiento mineral como *una información sistemáticamente organizada u ordenada que describe los atributos esenciales de una clase de yacimiento mineral*. Aquí las palabras claves son: sistemático, información y esencial.*

En el concepto primario de Ludington *et al.* (1985) antes referido, se puede considerar que la generación de los modelos de yacimientos minerales no es una actividad nueva, aunque sí un nombre nuevo, evolucionado de lo que los geólogos han estado haciendo desde hace cientos de años con las clasificaciones de los yacimientos minerales (Cox, 1993).

El proceso de conceptualización de un modelo pasa por la comprensión de que el concepto mismo es una noción que se puede derivar, bien de una fuerte inferencia o suposición según el criterio de Platt (1964) o a partir de sus interioridades según De Bonno, 1990, de que existe un vínculo entre ciertas unidades de información (Henley y Berger, 1993).

* La traducción es libre y de absoluta responsabilidad de los autores. (El subrayado es de los traductores.)

En 1979, Wilson introdujo este enfoque en el Servicio Geológico de los Estados Unidos y después el Servicio Geológico de Canadá publicó un documento con 40 tipos de yacimientos reconocidos en Canadá (Eckstrand *et al.*, 1984). La experiencia comenzó a generalizarse y transferirse desde el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, siglas en inglés) en los años iniciales de la década del 1970 (Cox, 1993).

El Programa de Modelos de Yacimientos Minerales auspiciado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, siglas en inglés) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, siglas en inglés), surgió en 1984 con el objetivo de hacer avanzar el conocimiento científico y la experiencia en la modelación de los yacimientos minerales para su utilización en la exploración, la evaluación y el desarrollo de los recursos (Cunningham *et al.*, 1993).

Este programa persigue el mejoramiento de los modelos de yacimientos minerales existentes hoy en día, desarrollar nuevos modelos donde sea apropiado, identificar los dominios tectono-estratigráficos favorables para tipos de yacimientos minerales específicos, y transferir la tecnología y la concepción de la confección de los modelos hacia los países en desarrollo (Cunningham *et al.*, 1993).

El primer trabajo fundamental sobre modelos de yacimientos minerales en la concepción que estamos utilizando fue elaborado por Erickson en 1981; con anterioridad, Singer había recopilado un grupo importante de informaciones durante la evaluación de los recursos en Alaska (Cox, 1993) y estos documentos constituyeron los antecedentes para la obra fundamental y pionera del *Bulletin 1693 Mineral deposits models* de Cox y Singer en 1986, que es el referente de la gran mayoría de los trabajos realizados sobre los modelos de yacimientos minerales.

Como ya señalamos, los modelos de yacimientos minerales no son nuevos; los modelos descriptivos deben haber existido en la mente de los geólogos desde que ellos y otros investigadores se dedicaron a la búsqueda argumentada de los yacimientos minerales. Actualmente se utilizan los modelos para sistematizar la experiencia y predecir las cosas que aún no han sido observadas.

Cada yacimiento mineral es único y esta exclusividad se debe a dos causas fundamentales (Barton, 1993).

1. Las diferencias en los procesos y ambientes de formación de los yacimientos minerales.
2. Las variaciones geológicas locales específicas del lugar donde se localiza el yacimiento mineral.

Si agrupamos los yacimientos de acuerdo con sus características específicas, tendremos una clasificación. Si especificamos cuáles características y requerimientos pertenecen al grupo, entonces tendremos las bases para un modelo. De esta manera sencilla, aunque muy difícil de resolver en la práctica, se plantea el problema fundamental de distinguir y descartar aquello que es in-

cidental, factores específicos de un yacimiento, de las propiedades más generales que pueden tener significado genético o que forman la base para la exploración y la evaluación (Barton, 1993).

Con independencia de los modelos que en su forma conceptual han existido desde hace siglos, su énfasis actual se debe a que la ciencia de los yacimientos minerales se encuentra en un estado de rápida madurez debido a varios factores:

1. La revolución en la geología global ha proporcionado un esquema general y abarcador, de forma tal que las ideas del científico ruso Bilibin se pueden ver confirmadas.
2. La geofísica ha permitido a los geólogos exploradores ver partes más profundas dentro de la litosfera, y la teledetección desde aviones e instalaciones cósmicas muestra rasgos tan amplios o tan agudos que no se pueden apreciar directamente en el terreno y requieren de una amplificación del campo visual de los geólogos.
3. Los isótopos estables y radiogénicos, las inclusiones fluidas, las microsondas iónica y electrónica, y otros métodos físicos y químicos de análisis, nos han proporcionado elementos críticos para comprobar las hipótesis.
4. Los datos geoquímicos e hidrológicos y el desarrollo de la computación han permitido enlazar los modelos con los procesos pertinentes de formación de las menas.

Los trabajos de exploración y evaluación de recursos minerales se realizan con una serie incompleta de datos, con afloramientos incompletos de los yacimientos y con una comprensión incompleta de la naturaleza precisa de lo que pueda representar el yacimiento mineral en cuestión. Los modelos proporcionan la vía mejor conocida para mejorar su imagen y transformarla en elementos reconocibles en el terreno.

Algunos problemas que deben tener respuestas inmediatas, según Barton (1986), son:

1. ¿Existe un número idóneo de modelos de yacimientos minerales?
2. ¿Se puede fijar a cada yacimiento en uno y sólo en un modelo?
3. ¿Es un modelo lo verdaderamente completo?
4. ¿Cuán completo debe ser un modelo para considerarse útil?

DEFINICIÓN DE MODELO DE YACIMIENTO MINERAL

Según Cox y Singer (1986), y Barton (1986), el término *modelo* genera en el contexto de las ciencias de la Tierra, una amplia variedad de imágenes mentales que van desde la duplicación física de la forma de un objeto, como sucede en los modelos a escala de laboreos de una mina, hasta un concepto unificador que explica o describe un fenómeno complejo, y proponen trabajar siempre en este último contexto.

Así, definen un modelo de yacimiento mineral como "la información sistemáticamente ordenada que descri-

be los atributos esenciales (propiedades) de una clase de yacimiento mineral" (Henley y Berger, 1993). Implícita en esta definición están dos ingredientes esenciales:

1. El modelo como un sistema de clasificación aceptable.
2. El modelo como una selección consciente de cuáles pueden ser los atributos esenciales de los miembros de este sistema de clasificación.

Se aprecia una coincidencia del criterio de Ludington *et al.* (1985) y el de Henley y Berger (1993) al señalar que el modelo puede ser empírico o descriptivo, en cuyo caso sus atributos se reconocen como esenciales aunque se desconozcan sus interrelaciones o puede ser teórico o genético, en cuyo caso los atributos están interrelacionados a través de algunos conceptos fundamentales.

Henley y Berger (1993) indican que los modelos pueden ser definidos más simplemente como "una descripción tentativa de un sistema o teoría que es válida para todas sus propiedades conocidas" o como "un esquema preliminar que sirve de plan a partir del cual en el caso de los yacimientos minerales, es posible el descubrimiento de estilos específicos de yacimientos".

Los modelos son redes de información que se construyen para una finalidad específica y por tanto deben ser inherentes a cada modelo una selección de la información, una red de vínculos de información y un objetivo para su utilización. Siguiendo a Barton (1993), un factor que favorece a los modelos genéticos sobre el simplemente descriptivo es el volumen puro y transparente de la información descriptiva necesaria para representar los variados rasgos de un yacimiento.

Plumlee y Nash (1995) definen un modelo de yacimiento mineral como "un sumario sistemático de información concerniente a las características geológicas, ley, tamaño y génesis de una clase de yacimientos minerales similares". También consideran estos autores que los modelos pueden ser empíricos o basados en observaciones o datos medidos y/o teóricos, basados en ideas conceptuales concernientes a la génesis del yacimiento.

Hodgson (1993) señala el modelo de yacimiento mineral como "un patrón conceptual y/o empírico que encierra tanto a los rasgos descriptivos del tipo de yacimiento como una explicación de estos rasgos en términos de procesos geológicos".

Biondy (1986) considera que los modelos geológicos son, ante todo, una acumulación de información que sirve para la comparación y la organización de los datos en grupos. Indica que la búsqueda de los yacimientos minerales fue empírica en sus inicios, pero que en la actualidad es deductiva; esta etapa deductiva se descompone en dos miembros que son: la determinación de las características del yacimiento y la selección del yacimiento. A partir de ellos se produce la organización en grupos de la información y se obtiene la tipología del yacimiento mineral. Concluye señalando que un modelo geológico es una figura que reúne todas las características tipológicas, según un orden lógico, dinámico y deductivo. Permite enmarcar de forma

fácil una información nueva en el contexto general de una característica a partir de aquéllas conocidas. En este caso el modelo se convierte en *conjunto mnemónico* el cual permite a quien prospecta, la memorización de las características útiles y utilizables en cualquier momento. Se trata de un sintetizador de conocimientos de uso imprescindible para el geólogo de yacimientos minerales.

Cox (1993) indicó que desde el surgimiento del concepto moderno de modelo de yacimientos minerales se ha producido una discusión sobre su importancia y los peligros para la exploración de recursos minerales e indica que uno de los puntos principales es que, al ser los modelos un método extremadamente útil de organización de los datos, pueden tender a la simplificación de fenómenos naturales muy complejos como son los que generan y caracterizan a estos objetos geológicos. Dicho de otra manera, datos importantes del yacimiento pueden pasar por alto al no ser incorporados en el modelo.

Cada modelo como hemos señalado tiene sus limitaciones, particularmente aquellas que pretenden retratar los rasgos esenciales de los fenómenos naturales. A este respecto, Hodgson (1993) indicó que las interacciones entre los constructores de los modelos que se han publicado, quienes a menudo son geólogos de instituciones académicas y gubernamentales, y los geólogos de exploración son fundamentales para la evolución de modelos más útiles y seguros.

A menudo es el yacimiento que no ha podido ser clasificado o una observación que no puede ser explicada coherentemente, lo que nos permite avanzar en nuestra comprensión. Los elementos fundamentales de la evaluación del potencial de recursos minerales son las descripciones de los tipos de yacimientos patrones que se utilizan para agrupar yacimientos similares. Estas descripciones patrones, entonces, se pueden utilizar como definiciones de yacimientos por análisis de expertos del potencial mineral de zonas geológicas perspectivas y proporcionan la base para la selección de los datos para la evaluación cuantitativa (Grunsky, 1995)

En 1992 el Servicio Geológico de Columbia Británica (BCGS, siglas en inglés) inicia un proceso de evaluación de los recursos minerales de dicha provincia y para ello se apoya en los trabajos anteriores del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, siglas en inglés). La parte fundamental de ese proceso fue la compilación de información acerca de los yacimientos minerales que incluyó la descripción, clasificación y datos sobre recursos, con los cuales se confeccionaron los *Minerals Deposits Profiles* o Perfiles de yacimientos minerales (Lefebure *et al.*, 1995; Lefebure y Ray, 1995; Lefebure y Höy, 1996).

Utilizando un formato similar a aquellos de los modelos de yacimientos de Eckstrand (1984), y Cox y Singer (1986), los perfiles de yacimientos minerales del BCGS pretenden ser modelos globales con suficiente información específica de Columbia Británica.

Cox y Singer (1986), en el USGS, clasifican los modelos con un esquema fundamentado en el ambiente geológico-tectónico de ubicación de los yacimientos minerales. Lefebure *et al.* (1995), Lefebure y Ray (1995) y Lefebure y Höy (1996) utilizan tres esquemas de clasificación: el primero, sobre la base de grupos de yacimientos; el segundo, clasifica los perfiles de acuerdo con la litología encajante más frecuentemente asociada, y el tercero, por el producto principal del yacimiento mineral.

Bases para la clasificación de los modelos de yacimientos minerales, según Cox y Singer -USGS- 1986

1. *Ambiente geológico-tectónico ígneo*
 - 1.1. Intrusivo
 - 1.1.1. Máfico-ultramáfico
 - a) Áreas estables
 - b) Áreas inestables
 - 1.1.2. Alcalino y básico
 - 1.1.3. Félsico
 - a) Fanero cristalino
 - b) Porfiroafanítico
 - 1.2. Extrusivo
 - 1.2.1. Máfico
 - 1.2.2. Félsico-máfico
2. *Ambiente geológico-tectónico sedimentario*
 - 2.1. Rocas clásticas
 - 2.2. Rocas carbonatadas
 - 2.3. Sedimentos químicos
3. *Ambiente geológico-tectónico metamórfico*
 - 3.1. Metavolcánico y metasedimentario
 - 3.2. Metapelita y metarenita
4. *Ambiente geológico-tectónico superficial*
 - 4.1. Residual
 - 4.2. Depositional

Grupos de yacimientos minerales del BCGS, según Lefebure *et al.*, 1995

- A. Yacimientos orgánicos
- B. Yacimientos residual/superficial
- C. Yacimientos de placer
- D. Yacimientos de sedimentos y vulcanitas continentales
- E. Yacimientos encajados en sedimentos
- F. Yacimientos de sedimentos químicos
- G. Yacimientos de la asociación volcánica marina
- H. Yacimientos epitermales
 - I. Yacimientos de vetas, brechas y stockworks
- J. Yacimientos tipo manto
- K. Yacimientos de skarn
- L. Yacimientos porfíricos
- M. Yacimientos en rocas máficas y ultramáficas
- N. Yacimientos de carbonatitas
- O. Yacimientos de pegmatitas
- P. Yacimientos encajados en metamorfitas
- Q. Yacimientos de gemas y piedras semipreciosas
- R. Rocas industriales
- S. Otros

Afinidad litológica de los yacimientos minerales descritos en los perfiles del BCGS

Rocas intrusivas

1. Intrusiones de granitoides
 - 1.1. Rocas encajantes volcánicas contemporáneas
 - 1.2. Rocas calcáreas encajantes
 - 1.3. Otras rocas encajantes
2. Intrusiones de anortositas
 - 2.1. Rocas encajantes calcáreas
3. Intrusiones máficas y ultramáficas
 - 3.1. Rocas encajantes calcáreas
 - 3.2. Rocas encajantes volcánicas contemporáneas
4. Intrusiones alcalinas
5. Carbonatitas

Rocas volcánicas

1. Rocas volcánicas subaéreas félsico-máficas
 - 1.1. Encajados fundamentalmente en vulcanitas
 - 1.2. Interestratificados o infrayacentes a rocas sedimentarias
2. Rocas volcánicas subacuáticas félsico-máficas
 - 2.1. Encajados fundamentalmente en vulcanitas
3. Marinas (máficas incluyendo las ofiolitas)
4. Rocas volcánicas alcalinas

Rocas sedimentarias

1. Químicas
 - 1.1. Evaporitas de playa
 - 1.2. Lacustres
 - 1.3. Evaporitas marinas
2. Carbonatadas
 - 2.1. Sin asociación con rocas ígneas
 - 2.2. Asociadas con rocas ígneas
3. Clásticas
 - 3.1. Biogénicas
 - 3.2. Arcillas
 - 3.3. Pizarras-aleurolitas
 - 3.4. Areniscas
 - 3.5. Conglomerados y brechas sedimentarias

Depósitos no consolidados

1. Residual
2. Aluvial
3. Marino

El *modelo final* de un yacimiento mineral debería estar integrado por varios tipos de modelos específicos, tales como: modelo descriptivo, modelo genético, modelo de ley y tonelaje, modelo de procesos cuantitativos, modelo de probabilidad de ocurrencia (Cox y Singer, 1986; Lefebure y Ray, 1995, Lefebure y Höy, 1996; Lefebure, Simandl, Hora, 1999), modelo numérico (McCammon, 1992), modelo de expresión geofísica (Hoover *et al.*,

1992), modelo geoambiental (Du Bray, 1995) y modelo de exploración (Henley y Berger, 1993).

TIPOLOGÍA DE LOS MODELOS DE YACIMIENTOS MINERALES

Modelos descriptivos

Puesto que cada yacimiento mineral es diferente a otro en una forma finita, los modelos deben progresar más allá del aspecto puramente descriptivo para poder representar a más de un simple yacimiento. Aquellos que comparten una variedad relativamente amplia y un gran número de atributos se caracterizan como un *tipo de yacimiento* y dicho modelo puede evolucionar.

Las interpretaciones genéticas generalmente aceptadas pueden desempeñar un papel significativo en el establecimiento de las clases de modelos. Pero los atributos descritos en éstos deben tener como meta, proporcionar una base para la interpretación de las observaciones geológicas, más que para proporcionar interpretaciones en la búsqueda de ejemplos. Los atributos señalados en los modelos deben ser guías para la evaluación de recursos y la exploración, tanto en la etapa de planeamiento como en la interpretación de los descubrimientos.

Los modelos descriptivos tienen dos partes. La primera es el *ambiente geológico*, que describe el escenario donde se encuentran los yacimientos; la segunda proporciona las características que identifican al yacimiento: los tipos de rocas y texturas se refieren a las rocas encajantes favorables de los yacimientos, así como la roca madre que se considera responsable de los fluidos hidrotermales que deben haber formado a los yacimientos epigenéticos.

La edad se debe referir a la del evento responsable de la formación del yacimiento. El *escenario tectónico* está relacionado con los principales rasgos o provincias, aquellos que se representan sólo a escala 1: 1 000 000 o menores, y no al control de las menas por las estructuras que son locales y, a menudo, específicas de una localidad.

El concepto yacimiento asociado, incluye a aquellos cuya presencia puede indicar condiciones favorables para yacimientos adicionales del tipo descrito por el modelo.

La segunda parte del modelo, que es la descripción del yacimiento, proporciona las características que identifican al yacimiento en sí, haciendo énfasis en particular en aquellos aspectos mediante los cuales el yacimiento puede ser reconocido a través de sus anomalías geoquímicas y geofísicas. En la mayoría de los casos, los modelos deben contener datos útiles para los proyectos de planeamiento de la evaluación de los recursos minerales y la exploración (Cox y Singer, 1986).

Lefebure y Ray (1995) en su *Guía para los autores de perfiles de yacimientos minerales*, exponen que su contenido debe abarcar:

- A. Nombre
 - Identificación de sinónimos

- Productos principales y subproductos
 - Ejemplos
- B. Características geológicas
- Descripción resumen
 - Escenario tectónico
 - Ambiente de deposición/Escenario geológico
 - Edad de la mineralización
 - Tipos de rocas encajantes y asociadas
 - Forma del yacimiento
 - Texturas/Estructuras
 - Mineralogía de la mena (principal y subordinada)
 - Mineralogía de la ganga (principal y subordinada)
 - Mineralogía de las alteraciones
 - Intemperismo
 - Controles de las menas
 - Modelo genético
 - Tipos de yacimientos asociados
 - Comentarios
- C. Guías de Exploración
- Rasgos geoquímicos
 - Rasgos geofísicos
- Otras guías de exploración
- D. Factores económicos
- Ley y tonelaje
 - Limitantes económicas
 - Usos finales
 - Importancia
- E. Referencias

Modelos genéticos

Muchos autores prefieren hacer una clara distinción entre los modelos descriptivos y los genéticos, pensando aparentemente que los modelos descriptivos representan en alguna medida la *verdad pura* mientras que los genéticos constituyen una posición filosófica menos objetiva. Siempre es deseable evitar las confusiones que se producen entre las interpretaciones y la realidad en sí misma; sin embargo, es bueno recordar que los geólogos cuando realizamos trabajos de campo acostumbramos a extrapolar las características de un punto a una determinada área de influencia de ese punto y, por lo tanto, se añade un componente de interpretación al hecho real.

Lo cierto es que una gran parte de nuestro conocimiento profesional descansa sobre una serie continua de interpretaciones, la mayoría de las cuales son tan comúnmente aceptadas, que no son cuestionadas. De ahí que Cox y Singer planteen que la combinación de modelos descriptivos y genéticos no debe ser incoherente con la práctica profesional de la exploración geológica (Cox y Singer, 1986).

El modelo comienza siendo generalmente descriptivo, pero varios de sus atributos se transforman en criterios genéticos a medida que ellos adquieren una explicación satisfactoria en ese sentido. Es decir, a medida que los

atributos de un modelo se comprenden en un sentido genético, el modelo descriptivo evoluciona hacia uno genético que es la compilación de las propiedades de un grupo de yacimientos relacionados en los cuales son identificados ciertos atributos si existen las evidencias para ello.

Los modelos genéticos pueden ser definidos como redes de información derivadas a partir de una amplia variedad de ciencias de la tierra, información económica y sociopolítica, con la finalidad de proporcionar una guía para la exploración como apoyo a las decisiones corporativas (Henley y Berger, 1993).

A partir de los modelos genéticos, se pueden derivar los modelos de probabilidad de ocurrencia y los de procesos cuantitativos (Cox y Singer, 1986).

Modelos de probabilidad de ocurrencia

Los modelos de probabilidad de ocurrencia son los que predicen la probabilidad de que un yacimiento de un tamaño y ley indicados por los propios modelos, se encuentre en un área dada. Al igual que en los modelos descriptivos y genéticos, los modelos probabilísticos que están ligados a entidades geológicas de rocas o estructuras son mucho más llamativos; de hecho, es muy difícil generar un modelo probabilístico útil, antes del establecimiento de un modelo genético. Los modelos seguros de probabilidad son muy difíciles de construir, puesto que aunque poseamos datos de los yacimientos minerales bajo explotación no los tenemos tanto sobre los que no lo están o son sencillamente insuficientes y, por tanto, la muestra base tiene un carácter extraordinario. Aún más importante es que los datos de las áreas estériles están dispersos y por tanto se hacen extrapolaciones a partir de una base muy fragmentada hacia una meta, que no es otra que el descubrimiento de un yacimiento mineral completamente invisible.

Modelos de procesos cuantitativos

Los modelos de procesos cuantitativos son aquellos que describen bajo ese prisma algunos procesos relacionados con la formación de los yacimientos minerales; ellos también surgen a partir de los modelos genéticos. Ejemplos de estos modelos pueden ser los de flujo de calor o de fluidos alrededor de un plutón en enfriamiento; la velocidad de crecimiento de los cristales en función de la supersaturación, impurezas y temperatura o de las secuencias y cantidades de minerales depositados a partir de la evaporación del agua de mar.

Modelos de ley y tonelaje

Estos documentos, generalmente, se presentan en forma gráfica y resumen estas dos propiedades de varios yacimientos de un mismo tipo, modelo descriptivo o modelo genético de yacimiento mineral.

Estos modelos se confeccionan ubicando en el eje horizontal los valores de la ley o el tonelaje, mientras que en el eje vertical se sitúan la proporción acumulativa de

TABLA 1. DESTINOS PRINCIPALES DE DISTINTOS TIPOS DE MODELOS

	Ley/Tonelaje	Descriptivo	Genético	Ocurrencia	Cuantitativo
Exploración/ Desarrollo	Principal	Principal	Principal	Menor	Menor
Suministrar potencial	Principal	Mínimo	Mínimo	Principal	Mínimo
Uso de la tierra	Principal	Menor	Mínimo	Principal	Mínimo
Educación	Mínimo	Menor	Principal	Menor	Principal
Guía de investigación	Mínimo	Menor	Principal	Menor	Principal

los yacimientos. Los yacimientos se identifican con un punto en el espacio y se utiliza una escala logarítmica; las curvas se trazan a partir de las acumulaciones de puntos correspondientes a los percentiles 90, 50 y 10 de todas las muestras tratadas.

En la tabla de Cox y Singer (1986) aparecen las principales aplicaciones de estos tipos de modelos antes descritos (Tabla 1).

Los modelos digitales de ley y tonelaje fueron desarrollados por Singer, Mosier y Menzie (1993), basados en los modelos de ley y tonelaje elaborados por Cox y Singer (1986), Mosier y Page (1988), y Bliss (1992). Según estos autores, este tipo de modelos es útil en la evaluación cuantitativa de los recursos y en el planeamiento de la exploración.

La existencia de los modelos de ley y tonelaje, así como de los estimados del número de yacimientos no descubiertos, permite tanto la estimación de los recursos que se pueden descubrir bajo diferentes condiciones de exploración como el análisis económico de estas fuentes de suministro potencial (Singer, 1993).

Las distribuciones de frecuencia de los tonelajes y leyes promedio de los yacimientos minerales bien explorados de cada tipo son modelos para la ley y el tonelaje de los yacimientos no descubiertos del mismo tipo en escenarios geológicos similares. Para cada tipo de yacimiento, estos modelos de ley y tonelaje ayudan a definir a un yacimiento en contraposición a una ocurrencia mineral o a una manifestación débil de un proceso menífero.

La construcción de los modelos de ley y tonelaje comprende varios pasos, el primero de los cuales es la identificación de un grupo de yacimientos bien explorados que se considere pertenezcan al tipo de yacimiento mineral que se está modelando. Se reúnen los datos de cada uno de ellos; estos datos consisten de las leyes promedio de cada metal o mineral de posible interés económico y los tonelajes basados en la producción total, reservas y recursos al *cutt-off* más bajo disponible.

Todos los datos usados en el modelo deben representar la misma unidad en la muestra, puesto que la

mezcla de datos a partir de yacimientos y distritos menores o de viejas producciones y estimados de recursos recientes, generalmente producen frecuencias bimodales o al menos no lognormales y pueden introducir correlaciones entre las variables que son resultado de las unidades de muestras mezcladas.

El paso siguiente es plotear los datos. Para el tonelaje y la mayoría de las variables de la ley, es necesario una transformación a logaritmos. La finalidad del ploteo y de la estadística es determinar si los datos contienen poblaciones múltiples (Singer, 1993).

Modelos numéricos

Los modelos numéricos de yacimientos minerales son parte del esfuerzo asociado a la economía de la materia prima mineral para lograr enfoques más cuantitativos para la evaluación de los recursos minerales no descubiertos en áreas gráficamente definidas. La decisión de definir los tipos de yacimientos minerales en un área dada es eminentemente subjetiva y la misma depende en gran medida de la experiencia del geólogo que la adopta; mientras más experimentado éste sea, los modelos seleccionados se corresponderán más con la realidad. Consecuentemente, un enfoque de equipo que agrupe a varios geólogos con conocimiento de diferentes modelos de yacimientos asegurará un espectro amplio de posibilidades para considerar (McCammon, 1992).

Esta idea dio origen al sistema experto llamado PROSPECTOR, desarrollado durante la mitad de los años 1979 para ayudar a los Geólogos a buscar los yacimientos ocultos (Duda, 1980). Un sistema experto se compone de programas informáticos competentes diseñados para resolver tareas especializadas mediante el razonamiento de las mismas y su dominio (Feigenbaum *et al.*, 1988).

Durante los años de su desarrollo, PROSPECTOR experimentó extensas evaluaciones y ensayos en el terreno; en 1983 más de 2 000 criterios se habían definido para describir 32 tipos diferentes de yacimientos minerales (McCammon, 1995).

En una sesión de trabajo típica con PROSPECTOR, el geólogo describe primeramente las características de un zona particular de interés, tales como un escenario geológico, controles estructurales, clases de rocas, minerales y productos de alteración presentes o supuestos. El sistema compara estas observaciones con el modelo de yacimiento mineral almacenado en la base de conocimientos y aprecia las similitudes, diferencias e información ausente. Entonces el sistema involucra al geólogo en un diálogo, con la finalidad de obtener información adicional relevante y utiliza esta información para evaluar el potencial mineral de la zona bajo análisis. El objetivo es proporcionar al geólogo un consejo que sólo podría ser obtenido con consultantes especializados en diferentes tipos de yacimientos minerales.

En 1983 el programa fue incorporado al USGS. Con posterioridad, se desarrolló PROSPECTOR II (McCammon, 1992, 1993) como consecuencia, entre otras cosas, del surgimiento de los modelos descriptivos de yacimientos minerales desarrollados por Cox y Singer en 1986 y Bliss en 1992. En la actualidad, este sistema tiene una base de conocimientos de 86 modelos de yacimientos y la información de más de 140 yacimientos minerales.

En pocos minutos, el geólogo puede entrar los datos observados para un área, seleccionar los tipos de modelos de yacimientos para ser evaluados, recibir consejos y sugerencias sobre aquellos modelos que más se asemejan a los datos observados y, para un modelo particular, encontrar cuáles datos pueden ser explicados, cuáles son inexplicables y cuáles atributos críticos o definitorios del modelo no se observan en los datos proporcionados.

Entre otras cosas, esta información es de utilidad para determinar en qué medida los datos disponibles para un área se asemejan al modelo de yacimiento almacenado en la base de conocimiento; qué datos adicionales pueden ser necesarios para llegar a conclusiones firmes y

cuándo puede ser considerado un modelo diferente de yacimiento. (McCammon, 1993).

Los modelos numéricos se diferencian de los descriptivos en que las calificaciones o marcaciones están asociados con cada modelo. Una calificación máxima se obtiene cuando el geólogo concluye que todos los atributos de un modelo particular están presentes. Sin embargo, las marcaciones máximas para diferentes modelos pueden diferir y la razón es que los modelos se construyen a partir de diferentes atributos (McCammon, 1992).

Una calificación positiva refleja el grado en el cual un modelo sugiere la presencia de un atributo particular. Una calificación negativa refleja el grado en el cual se niega al modelo cuando un atributo está ausente. Si por otro lado, la ausencia de un atributo es característica de un modelo, se registra una calificación positiva asociada con su ausencia y una calificación negativa se asocia entonces con su presencia. En consecuencia, la situación de la presencia o la ausencia se corresponde respectivamente con las condiciones de suficiencia y necesidad de un atributo para un modelo.

Los atributos de los modelos numéricos están agrupados en indicadores similares a los de los modelos descriptivos. Ellos son: rango de edad, tipos de rocas, textura/estructura, alteración, mineralogía, característica geoquímica, característica geofísica y yacimientos asociados. No todos los indicadores contenidos en los modelos descriptivos se incluyen en los modelos numéricos. La razón es que aún no es posible definir una taxonomía y asignar calificaciones o marcaciones positivas y negativas a atributos tales como: *marco tectónico*, *ambiente de deposición* o *control de la meniferación*

La tarea de asignar calificaciones positivas y negativas a los atributos en los modelos numéricos fue favorecida por los índices preparados por Barton (1986) y Cox y Rytuba (1987). Estos índices contienen información sobre la frecuencia de ocurrencia o presencia de anom-

TABLA 2. NIVELES DE CUANTIFICACIÓN PARA DETERMINAR LA PRESENCIA/AUSENCIA DE YACIMIENTOS MINERALES ESPECÍFICOS

ESTADO	NIVEL	DESCRIPCIÓN VERBAL
		Grado de suficiencia
Presencia	+5	Muy altamente sugerente
Presencia	+4	Muy sugerente
Presencia	+3	Moderadamente sugerente
Presencia	+2	Medianamente sugerente
Presencia	+1	Débilmente sugerente
		Grado de necesidad
Ausencia	-1	Presente con poca frecuencia
Ausencia	-2	Presente ocasionalmente
Ausencia	-3	Presente comúnmente
Ausencia	-4	Presente casi siempre
Ausencia	-5	Virtualmente siempre presente

lías geoquímicas, minerales y tipos de alteración de acuerdo con los modelos descriptivos.

Asociado con cada atributo está un índice numérico que varía desde +5 hasta -5 en un sistema similar al de PROSPECTOR (Duda *et al.*, 1977) Los números representan lo común o lo raro de cada atributo, y los números 1,2,3,4 y 5 representan a rangos de relación de frecuencia de 0-10, 10-30, 30-70, 70-90 y 90-100 %, respectivamente, entre el atributo y los yacimientos representados en los modelos.

En la Tabla 2 se aprecia que cada atributo tiene asignado un número positivo o negativo para cada modelo.

En los modelos numéricos se diseña un método más simple. Para un modelo de yacimiento dado se considera que un atributo:

1. Está presente
2. Se sospecha su presencia
3. Está perdido
4. Está ausente

La pérdida se considera como un atributo que se ha visto pero no encontrado; la ausencia significa que el atributo ni está presente, ni es sospechoso de estarlo o se conoce a ciencia cierta que está ausente. En todos los casos, el atributo con esta última condición tiene la calificación de 0; de esta manera, si no existe información sobre el conocimiento del yacimiento en un área, el indicador "yacimientos asociados" tiene un valor 0. Si solamente algunos de los atributos dentro de un indicador están perdidos, los atributos que lo estén son asignados a una valoración correspondiente al valor -1. Los atributos que se sospeche que están presentes, se asignan al siguiente nivel positivo asociado con su presencia. La experiencia indica que este tratamiento a la incertidumbre en las observaciones es suficiente para tener en cuenta la calidad de la información disponible en la evaluación de los recursos minerales.

En resumen, los modelos numéricos de yacimientos demuestran la factibilidad técnica de codificarlos para proporcionar:

1. Un consultante numérico para la evaluación regional de los recursos minerales.
2. Evaluaciones objetivas de marcos o escenarios geológicos particulares como parte de la evaluación regional.
3. Determinación del modelo o de los modelos más favorables que deben ser esperados en un escenario geológico particular.

Este enfoque es particularmente valioso para:

1. Discriminar bases de datos sobre manifestaciones minerales.
2. Suministrar instrucción sobre la geología de los yacimientos minerales
3. Sistematización del desarrollo de los modelos de yacimientos minerales
4. Introducir procedimientos objetivos para la evaluación numérica de los modelos.

Los modelos numéricos nunca serán mejores que los descriptivos; debido a que las técnicas usadas para de-

sarrollar los modelos numéricos son relativamente nuevas, pocos geólogos están familiarizados con ellas, pero como las ventajas de este enfoque numérico se aprecia cada vez más, de seguro muchos más geólogos estarán interesados en esta actividad.

Modelos de exploración

La diferencia esencial entre un modelo descriptivo de yacimiento y un modelo de exploración es que, en estos últimos, los vínculos de la idea conceptual o guía se pueden ir incorporando sucesivamente a medida que avanza el proceso de la exploración del yacimiento. Así, en los modelos de exploración, la red de vínculos es el esquema conceptual del modelo (Henley y Berger, 1993).

El proceso de exploración basado en modelos de este tipo debe ser un proceso de optimización, el cual se realiza añadiendo valor (v) a las unidades de información, lo que le proporciona una jerarquía a la red de información. Ésta es un componente importante para la toma de decisión en la exploración que requiere inmediatez.

El valor (v) está formalmente definido como una función de la utilidad de la información obtenida a diferentes escalas y estadios de la exploración dividido entre el costo de obtención de estos datos. De esta forma, la ecuación queda planteada de la manera siguiente:

$$v = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{Utilidad inicial de} \\ \text{las observaciones} \\ \text{e información} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Utilidad incrementada} \\ \text{por medio de la infor-} \\ \text{mación adicional} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{Costo de la infor-} \\ \text{mación inicial} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Costo de la infor-} \\ \text{mación adicional} \end{array} \right)}$$

El proceso de conceptualización en los modelos de exploración es una noción que se puede derivar bien a partir de una fuerte inferencia o desde la certidumbre de que existe un vínculo entre ciertas unidades de información. Un concepto de exploración puede surgir a partir de una tormenta de ideas individual o colectiva que reconoce que una región contiene elementos geológicos que sugieren la presencia de ciertos estilos de mineralización (por analogía con otros distritos y aquí entra en función el modelo descriptivo de los yacimientos minerales) o que ciertos procesos geológicos pueden haber ocurrido allí.

Al igual que en los modelos de yacimientos, para mantener un fin competitivo, el modelo de exploración debe evolucionar en el tiempo, en respuesta a la adquisición de nueva información y al desarrollo consciente de vínculos conceptuales. Así, la nueva información geológica y la nueva tecnología disponible, permiten tanto nuevos vínculos conceptuales como la definición de nuevas metas de exploración (Henley y Berger, 1993).

Modelos de expresión geofísica

La mayoría de los yacimientos minerales cerca de la superficie ya han sido descubiertos lo que ha conducido a la realización de programas de exploración integrados, con la finalidad de mirar hacia las profundidades del subsuelo o áreas que están cubiertas. Los métodos

geofísicos de exploración proporcionan una ventaja importante en este proceso y el uso efectivo de los datos geofísicos integrados nos permite un cuadro tridimensional del subsuelo.

La incorporación de las características geofísicas constituye un importante componente en la evolución continua de los modelos de yacimientos minerales y, por lo tanto, son un complemento valioso en su desarrollo. La finalidad de un modelo de expresión geofísica es proporcionar donde sea posible los valores cuantitativos de una respuesta geofísica del yacimiento mineral puesto que, como ya se ha indicado, la función final de un modelo de yacimiento es la utilización de las características geológicas, geoquímicas y geofísicas para revelar la génesis y para hacer una mejor predicción en la localización de nuevos yacimientos, lo que conducirá a una evaluación de recursos minerales más segura y a programas de exploración exitosos (Hoover *et al.*, 1992).

Aunque en este trabajo no aparece desarrollado el modelo geoambiental, debemos decir que es un modelo muy importante para tomar en consideración en aras de lograr una minería sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, P. B.: "Commodity/geochemical index", en D. P. Cox, D. A. Singer, eds.: *Mineral deposits models, USGS Bulletin 1693*, 1986.
- BARTON JR., P.B.: "Problems and Opportunities for Mineral Deposits Models", en R. V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I. Thorpe y J. M. Duke, eds.: *Mineral Deposit Modelling, GAC, Special Paper 40 :7-14*, 1993.
- BLISS, J. E., ed.: *Developments in mineral deposit modelling. USGS Bulletin 2004*, 1992.
- BUSTILLO, M. Y C. LÓPEZ-JIMENO: *Recursos minerales*, 372 pp., Madrid, 1996.
- COX, D. P.: "The development and use of mineral deposits models in the United States Geological Survey", en: R. V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I., Thorpe y J. M. Duke, eds.: *Mineral Deposit Modelling, GAC, Special Paper 40 : 14-20*, 1993.
- COX, D. P. Y D. P. SINGER, eds.: *Mineral deposits models, USGS Bulletin 1693*, 1986.
- COX, D. P., J. J. RYTUBA: Lihir Isalan gold: a suplement to *USGS Bulletin 1693*, Open file report 87-272^a, 1987.
- DU BRAY, E. A., ed.: Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models. USGS Open file Report 95-0831, 1995.
- ECKSTRAND, O. R., W. D. SINCLAIR Y R. I. THORPE, eds.: "Geology of Canadian Mineral Deposit Types", *Geological Survey of Canada*, 8:1-7, 1996.
- FEIGENBAUM, E., P. MCCORDUCK Y H. P. NII: *The rise of the expert company*, 322 pp., New York, Times Book Inc., 1988.
- GRUNSKY, E. C.: "Grade-Tonnage Data form Mineral Deposit Models", en: *British Columbia Deposit Profiles: An introduction*, 1995.
- HENLEY, R. W. Y B. R. BERGER: "What is an exploration model anyway? An analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration", en: R.V. KIRKHAM, W. D. SINCLAIR, R. I. THORPE Y J. M. DUKE: *Mineral Deposit Modelling, GAC, Special Paper 40: 41-45*, 1993.
- HODGSON, C. J.: "Uses (and abuses) of ore deposit models in mineral exploration", en *Ore deposit models*, vol. II, P. A. Shearon y M. E. Cherri, eds.: Geoscience Canada, Reprint Series, 6 : 1-11, 1993.
- HOOVER, D. B, W. D. HERAN Y P. L. HILL, eds.: The geophysical expression of selected mineral deposit models. USGS Open file Report 92-597, 1992.
- KOTLIAR, V. N.: *Osnovi teorii rudoobvrazovania* (en ruso), Ed. Niedra, Moscú, 1970.
- LEFEBURE, D. V. Y T. HÖY, eds.: "Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles", Volume 2: *Metallic Deposits*. Open file 1996-13, Updated February 2000.
- LEFEBURE, D.V. Y G. E. RAY, eds.: "Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles", Volume 1: *Metallics and Coal*, Open file 1995-20, Updated February 2000.
- LEPIN, O. V. Y J. D. ARIOSA: *Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de yacimientos minerales sólidos*, 348 pp., Primera Parte, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1986.
- LUDINGTON, S., P. B. BARTON JR., K. M. JOHNSON: Mineral deposits models: theory and practice. Open file report 85-391, 1985, USGS.
- MCCAMMON, R. B.: "Recent development in Prospector and future expert systems", en McCammon: *Prospector II An expert System for mineral deposit models*, 1993.
- : Numerical mineral deposit models, en J. D. Bliss ed.: "Developments in mineral deposit modelling", *USGS Bulletin 2004*, 1992.
- : "Prospector II- an expert system for mineral deposit models", en Kirkham R. V., Sinclair W. D., Thorpe R. I. y Duke, eds.: *GAC Special Paper 40: 679-684*, 1995.
- MCLEOD, JR. R.: *Management Information systems*, 5th ed., McMillan Publishing. Co. 1993.
- MILENBUCH, D. C.: "An early appraisal approach to exploration projects", *Mining Cong. Journ*, 64, 1978.
- OHLE, E. L Y R. L. BATES: "Geology, Geologist and Mineral Exploration", en B. J. Skinner, ed.: *75th Anniversary Volume*, 1981.
- PLUMLEE, G. S. Y J. TH. NASH: "Geoenvironmental models of mineral deposits: fundamentals and applications", en E. A. Du Bray, ed.: Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposits models USGS Open file Report 95-0831, 1995.
- SINIAKOV, V. I.: *Osnovi teorii rudongeneza* (en ruso), Ed. Niedra, Moscú, 1987.
- SMIRNOV, V. I.: *Geología de yacimientos minerales*, Ed. MIR, Moscú, 1982.