

MODELOS DE ESTIMACION DEL POTENCIAL MINERO DE UNA REGION: UNA REVISION

LUIS N. HENRIQUEZ

Depto. de Minas, Fac. Ingeniería, U. Técnica del Estado,
Casilla 10233, Santiago, Chile

RESUMEN

El alto costo que significa efectuar programas efectivos de exploración ha generado un gran interés en la búsqueda de métodos tendientes a optimizar la asignación de recursos en exploración para evaluar las perspectivas económicas de un área. En las últimas dos décadas han sido desarrollados distintos tipos de modelos que permiten cuantificar la apreciación del potencial minero de una región.

En el presente trabajo se revisan los aspectos metodológicos de los diversos tipos de modelos propuestos: espaciales, geomatemáticos, y de probabilidad subjetiva y opinión geológica. Se analiza además, la evolución que han experimentado estos modelos y su posible aplicabilidad en el contexto nacional.

ABSTRACT

The high cost of conducting an effective regional exploration program, has generated an increasing interest in methods of optimizing the resource allocation to exploration, for the appraisal of the economic prospect of an area. Quantitative methods in the appraisal of mineral potential have been developed since the last two decades.

A review of the main type of quantitative models -spatial, geomathematical, and subjective probabilities and geologic opinion approaches- is presented in this paper. Their evolution and their potential application to Chilean conditions is also analyzed.

INTRODUCCION

Los análisis geológicos cualitativos, tendientes a estimar el potencial minero de una región, son muy valiosos para la exploración y han permitido la localización exitosa de numerosos depósitos económicamente importantes. Este enfoque, sin embargo, no es muy adecuado para un análisis de recursos regionales, que estudie y cuantifique tanto sus aspectos económicos como el potencial de estos recursos. En las últimas dos décadas, ha sido desarrollada una serie de modelos para estimar cuantitativamente el potencial minero de una región. Harris (1967), en una primera revisión de los modelos existentes, analizó críticamente las características de los modelos espaciales y describió un modelo geomatemático propio. En el trabajo de Agterberg y Kelly (1971) se describen las técnicas estadísticas usadas en los modelos desarrollados hasta esa fecha. Estas revisiones de la literatura han sido puestas al día en los comenta-

rios introductorios de los trabajos de Griffiths y Singer (1972), Harris (1973) y Agterberg (1975).

Más recientemente, Peters (1978) y Agterberg y David (1979) señalan los avances alcanzados en estas materias. Es interesante destacar que en el trabajo de Agterberg y David se analizan los estudios efectuados por investigadores europeos orientales.

El empleo de estos modelos requiere del desarrollo de una base de datos extensa. Este problema ha sido abordado por Fabbri (1975), cuyo trabajo discute el diseño y estructura de los sistemas de base de datos desarrollados por el Servicio Geológico de Canadá, empleados para la predicción del potencial minero de una gran región.

En este trabajo se revisan los aspectos metodológicos de los modelos cuantitativos, espaciales, geomatemáticos, y de probabilidades subjetivas y opinión geológica. Se examinan además, las condi-

ciones de aplicación y los modelos en el contexto nacional. Estos modelos pueden ser de interés para organismos de planificación regional, interesados en la definición de políticas públicas que alienten las inversiones en la exploración de los recursos minerales de la región bajo su jurisdicción. También pueden ser de utilidad para los estudios de pre-factibilidad de una planta regional de beneficio de minerales para estimar, además del monto de las inversiones en exploración e infraestruc-

tura que sería necesario efectuar para asegurar el suministro esperado de minerales, las posibles reservas minerales que alimentarían la planta.

Es necesario advertir, sin embargo, que la confiabilidad de los resultados obtenibles depende directamente de la cantidad y calidad de la información de base empleada y que, además, el empleo de estos modelos no conduce a una localización exacta de posibles prospectos.

MÉTODOS CUANTITATIVOS

La existencia de estos métodos para la apreciación del potencial minero, como una ayuda para la exploración y para la estimación de los recursos minerales de una región, es relativamente reciente. Su desarrollo ha sido estimulado por el alto costo que significa efectuar programas efectivos de exploración regional, y por la consiguiente ne-

cesidad de optimizar la asignación de recursos para evaluar las perspectivas económicas de un área. Estos modelos integran las variables de la exploración de minerales, con todas las fases de las operaciones de la empresa minera y permiten mejorar los objetivos de rentabilidad.

MODELOS ESPACIALES

Los modelos espaciales fueron los primeros en ser desarrollados y examinan algunas medidas de los recursos minerales, tales como distritos mineros, minas, producción de minerales y las relaciones con la geografía. La principal característica de estos estudios es el empleo de razonamientos puramente matemáticos y económicos, aplicados a distribuciones matemáticas conocidas de depósitos minerales o distritos mineros, y no consideran a geología.

La primera aplicación de importancia de este tipo de modelo fue realizada por Allais (1957). Su objetivo fue la estimación del valor actualizado neto esperado de la exploración del Sahara argelino. Allais dividió esta región en zonas territoriales de 10 km² a las cuales llamó celdas. Como áreas de control para la estimación del número de celdas que pudieran existir en el Sahara, seleccionó el territorio del oeste de Estados Unidos y ciertas áreas de Europa. Allais estimó que la función de Poisson se ajustaba razonablemente bien a la distribución de distritos en esas áreas exploradas:

$$F(x) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^x}{x!}$$

en que x es la variable que expresa el número de

distritos mineros por celda y λ es un parámetro de densidad (número promedio de distritos por celda). Allais estimó además, que la distribución lognormal se ajustaba bien a los valores de los distritos y postuló una distribución normal, como representativa de la distribución de valores de los parámetros adimensionales, tales como la desviación standard.

La actividad de búsqueda de yacimientos minerales se consideró dividida en tres etapas. La primera etapa consiste en la exploración regional de reconocimiento, tal como el levantamiento fotogeológico, el trabajo geológico general de terreno, los reconocimientos geofísicos aéreos. El objetivo de esta etapa es seleccionar aquellas sub-áreas de interés, para explorarlas con mayor profundidad en una etapa posterior. La segunda etapa consiste en la prospección geológica, geofísica y geoquímica detallada. En la tercera etapa se examina con mayor detalle, mediante sondajes, zanjas y piques de prueba, las celdas retenidas después de completar la segunda etapa, con el objeto de probar las reservas minerales. La actividad de búsqueda de yacimientos quedó definida de este modo por tres probabilidades: 1) probabilidad que una celda que contiene un depósito económico quede retenida en la primera etapa

(p_1); 2) probabilidad que una celda que contiene un depósito económico quede retenida en la segunda etapa (p_2), y 3) probabilidad que la celda dé origen a una propiedad productiva (p_3).

La función de Poisson, como un modelo espacial de ocurrencia, ha sido cuestionada por varios autores, quienes han propuesto, alternativamente, la función exponencial y la distribución binomial negativa como más adaptables a la descripción del número de yacimientos por celda (Slichter y otros, 1962; Byrne, 1969; Agterberg, 1975).

Una aplicación reciente de modelos espaciales la constituye el trabajo realizado por Sarma (1979) para elaborar una estrategia de exploración del área de Ingadhah en India.

Los modelos espaciales suponen que, en la exploración, tiene sentido considerar a todas las celdas como igualmente probables. Esto está, obviamente, en contradicción con el enfoque tradicio-

nal, sobre todo si estos modelos son aplicados a poblaciones geológicas distintas. Las condiciones para la ocurrencia del modelo espacial son, por lo tanto, altamente restrictivas y se alejan considerablemente del mundo real. La distribución de recursos minerales en la naturaleza es, de hecho, no-uniforme. El modelo espacial, sin embargo, puede todavía encontrar aplicación en ciertas circunstancias. Las condiciones pueden ser tales que los geólogos no tengan ningún conocimiento en relación a los parámetros del modelo de ocurrencia y, además, puede que no existan datos geológicos sobre un área. En tales casos, los modelos espaciales proporcionan una apreciación del total de recursos contenidos en grandes áreas, y este valor puede ser usado como una primera aproximación para definir políticas estatales, en relación a la exploración de esa región.

MODELOS GEOMATEMATICOS

MODELO DE INFERENCIA GEOESTADISTICA MULTIVARIABLE

La premisa básica de este modelo, desarrollado por Harris (1967), es que la ocurrencia física de los depósitos minerales es una función de los procesos terrestres, que se ven reflejados en fenómenos geológicos. Un corolario de esta premisa es que la probabilidad de ocurrencia mineral, en términos de su valor bruto, varía de área en área en la medida en que la geología varía en estas áreas. Los postulados básicos del modelo geoestadístico de variables múltiples son:

$$V = (R, S, A, F) \quad , y$$

$$p(V) = G(R, S, A, F, V)$$

en que

- V = medida de la riqueza mineral
- $p(V)$ = probabilidad de ocurrencia de V
- R = edad y tipo de la roca
- S = formas estructurales
- F = fracturamiento de la roca
- A = edad de la actividad ígnea y relaciones de contacto.

Estos cuatro factores geológicos, definidos anteriormente, fueron medidos en un estudio del potencial de metales básicos en el sudoeste de los

Estados Unidos. Se definieron 26 variables para la medición de las variables mencionadas anteriormente, y se utilizó la información disponible en mapas geológicos de un área de control situada en Nuevo México y Arizona.

El valor de la riqueza mineral se determinó acumulando la producción anual de todos los distritos mineros dentro de una celda (20 millas cuadradas). Cada una de las celdas fue clasificada dentro de 6 grupos de valores, de acuerdo al valor de su producción acumulada.

La relación entre probabilidades, variables geológicas y riqueza mineral, fue definida empleando análisis multidiscriminante y análisis de clasificación por estadística bayesiana y haciendo uso de la función de probabilidad multinormal.

Este modelo requiere cierto nivel de información geológica, con el objeto de discriminar probabilísticamente entre celdas. De este modo, el modelo utiliza la información disponible del área de control, para estimar el potencial del área en estudio. Para que esta inferencia sea válida, se deben satisfacer ciertas condiciones. Una de ellas es que ambas áreas pertenezcan a la misma provincia metalogénica; de otro modo, el modelo debe incluir las variables que describen los efectos del cambio. Otra de estas condiciones es que las variables de medida obedezcan a una distribución multinormal.

Los resultados obtenidos con este modelo no pueden ser superiores en calidad a la información sobre la cual están basados. Por este motivo, se debe poner especial cuidado en la formulación del modelo conceptual. En la etapa inicial del análisis y antes de efectuar la inferencia, se debe determinar si las relaciones entre la geología y la ocurrencia de minerales son significativas o son debidas a influencias aleatorias. Con este fin se usa el análisis discriminante.

La validez de este modelo fue probada seleccionando un área de estudio que comprendía la mayor parte del estado de Utah. Se computó el potencial de recursos de cada celda en este estado. El producto de este modelo de ocurrencia consiste, para cada celda, en probabilidades para varias clases de valores (descritos en términos de dólares de la producción mineral bruta, más reservas). Se utilizó una simulación por el método Monte Carlo, para determinar sucesivamente la clase de valor mineral al cual pertenece la celda, el valor total de la celda, el número de minas por celda, el valor por mina, la ley asociada con cada uno de los valores por mina y el tonelaje para cada uno de los depósitos de la celda.

OTROS MODELOS GEOMATEMATICOS

Otros modelos experimentales comparables han sido desarrollados por otros investigadores (Kelly y Sheriff, 1969; De Geoffroy y Wignall, 1970; Sinclair y Woodsworth, 1970; Agterberg, 1971; Cruzat y Meyer, 1974; Chung, 1976; Umar, 1978; Favini y Assad, 1979). Estos modelos hacen uso, también, de una combinación de métodos de análisis, lo cual produce, a menudo, mejores resultados que la aplicación de una técnica simple. Los análisis discriminantes, de factores y de agrupamiento (cluster analysis), son herramientas útiles para el análisis de datos de exploración, con el objeto de seleccionar aquellas áreas con el valor po-

tencial más alto. El análisis de superficie de tendencia (trend-surface analysis), en combinación con un análisis de regresión múltiple, permite relacionar intensidad de mineralización con anomalías observadas. Para la utilización de estos métodos es necesario desarrollar ecuaciones basadas en un área de control bien conocida y desarrollada. Estas ecuaciones son empleadas, posteriormente, para realizar predicciones en un área de estudio menos conocida. Con el objeto de probar los méritos de estos modelos, se pueden seleccionar dos áreas igualmente conocidas, que sirvan de área de control y de estudio, respectivamente. Así la información disponible sobre la mineralización del área de estudio es usada para comparar los resultados obtenidos por el modelo.

Una aplicación reciente del uso de estas técnicas lo constituye el modelo desarrollado por Favini y Assad (1979). Este modelo se basa en el análisis discriminante de señales contenidas en varios mapas regionales, principalmente geofísicos, el cual cubre territorios con depósitos productivos e improductivos, como también territorios de interés para efectuar prospección. En el modelo se asume la existencia de un grupo de depósitos económicos significativos y de otro con depósitos marginales o no económicos. El análisis discriminante permite decidir, estableciendo probabilidades, a cual grupo pertenecen las características seleccionadas de un depósito y, por extensión, estimar si el área en estudio es favorable o no, y si vale la pena continuar los costosos trabajos de exploración. Con este modelo es posible generar mapas probabilísticos que indiquen el potencial minero; pueden ser generados fácilmente y usados por los profesionales para completar sus estrategias particulares de prospección, siempre que éstos admitan que un enfoque probabilístico es ahora posible en la prospección de minerales.

MODELOS DE PROBABILIDADES SUBJETIVAS Y OPINION GEOLOGICA

Este modelo fue desarrollado para evaluar el potencial de minerales metálicos y preciosos del área de Sonora México (Harris, 1973a). Posteriormente, fue aplicado en un extenso estudio de los recursos minerales para estimar el potencial productivo de minerales del territorio noroeste de Canadá (Harris, 1970).

El modelo está basado en la transformación en

probabilidades de la opinión de geólogos expertos en la ocurrencia de recursos minerales. Estas probabilidades generan, a través de varias etapas en la simulación, un depósito en términos de tonelaje y ley. El objetivo es extraer, de los juicios de los geólogos, una expresión de ocurrencia probable de depósitos minerales, dentro de una profundidad explotable, con énfasis sobre la ocurrencia

de éstos, en contraste con su descubrimiento. En las aplicaciones de estos modelos, se recogieron opiniones en términos de tonelajes específicos y leyes, con el objeto de obtener una medida de la ocurrencia física de la mineralización y realizar posteriormente, sobre esta base, varios análisis económicos (Fig. 1).

El enfoque de las probabilidades subjetivas y opinión geológica proporciona, de este modo, detalles sobre tonelaje y leyes para áreas con buena información. Sin embargo, para áreas con poca información o de poco interés en el momento de

efectuarse la estimación, puede anticiparse que la aplicación de este modelo, en estas condiciones, subestimaré el potencial de recursos minerales. Esto ocurre debido, simplemente, a la falta de asociación en la mente del geólogo de la ocurrencia mineral en esa área. El mayor problema operacional con el uso de probabilidades subjetivas, es que el potencial mineral implícito de un área es una función de la experiencia y la imaginación del geólogo. Los resultados obtenibles con este modelo serán, por lo general, conservadores.

FIG. 1. Formulario para recoger la opinión geológica sobre ocurrencia de depósitos minerales.*

Latitud y Longitud del pto. N.E.

6	6	0	0	1	2	4	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Plomo - Zinc			
	Ley %		
	1	6	10
	↓	↓	↓
Tons. (Millones)	5	10	20
1 - 5			
5 - 10	1	3	8
10 - 25	2		
25 - 50			
50 - 100			
100 - 300			
300 -			

Numero de depósitos	Probabilidad
0	
1	
2	
3 - 5	
5 - 7	
7 - 9	2
9 - 12	10

NOTAS

EXPERTO N° 2

* Según Harris y otros (1970)

FUNCION DE EXPLORACION

Las formas de la relación funcional entre costos y rendimiento de la prospección no son conocidas y la información necesaria para una definición de esta relación no se encuentra fácilmente disponible. A causa de la complejidad del proceso de exploración, la relación empírica que se formule será, obviamente, una simplificación de la realidad y de la relación existente.

La manera en la cual los costos de exploración debieran incluirse en un modelo de recursos regionales no ha sido definida claramente. Algunas de las aproximaciones usadas son: 1) una estimación muy simple, basada en la estadística a largo plazo de los gastos en exploración de las empresas mineras, que representa aproximadamente el 4% del valor bruto de la producción mineral. Este

valor se considera como gastos anuales en exploración con una probabilidad de descubrimiento: $p = 0,5$ (Brant, 1968); 2) una función de exploración de la forma siguiente:

$$p = 1 - e^{-(bE + cE^2)}$$

en que

p = probabilidad de descubrimiento
 E = valor del esfuerzo en exploración (US\$)
 b, c = coeficientes determinados por regresión, y

3) en base a encuestas a profesionales que trabajaban en la prospección del área en estudio, Harris (1970) postuló la siguiente relación:

$$p = 1 - e^{-4\alpha E}$$

en que

p = probabilidad de descubrimiento
 E = cantidad gastada en exploración (0,004 del valor bruto del mineral por descubrir) y
 α = coeficiente determinado por regresión

APLICABILIDAD DE LOS METODOS CUANTITATIVOS EN EL AMBITO NACIONAL

De acuerdo con las políticas a largo plazo enunciadas por el Gobierno, en relación a la explotación de sus recursos extractivos, se contempla que: 1) el país debe plantearse el aprovechamiento de las ventajas comparativas que presentan sus recursos minerales a través de un desarrollo programado de éstos y, 2) en cada región deben desarrollarse aquellos sectores y actividades que tengan ventajas comparativas y que correspondan a las vocaciones regionales, contemplándose, como política complementaria, la promoción de la prospección de recursos y potencialidades regionales, para que el sector privado disponga de la mejor información sobre las posibilidades de inversión. La acción del Estado es concebida mediante la aplicación del principio de subsidiaridad, en el cual "el Estado sólo asume directamente aquellas funciones que las sociedades intermedias o particulares no están en condiciones de cumplir adecuadamente" (ODEPLAN, 1977).

En estas condiciones, la aplicación de los métodos cuantitativos señalados anteriormente permitiría contar, por parte del Estado, con un mejor nivel de información para la implementación de estas políticas nacionales. Contribuiría, además, a definir con mayor precisión cual debe ser el rol subsidiario del Estado en materias de promoción de la prospección de sus recursos minerales, para lograr el nivel óptimo de utilización de estos recursos, en relación a las políticas de desarrollo nacional. La aplicación diferenciada de los modelos descritos anteriormente, para distintos niveles de información geológica disponible, permite estimar el valor de la posible producción de los recursos minerales, el monto de las inversiones, tanto en

las distintas etapas de exploración como en la explotación que es necesario efectuar, y el nivel de riesgo asociado con cada una de estas inversiones. Este conocimiento permitiría definir el nivel del esfuerzo que debe asumir el Estado en esta labor de promoción de la prospección para alcanzar sus objetivos y permitiría, además, comparar estas inversiones en base a criterios objetivos de rentabilidad social, con otras alternativas de inversión social que pudieran existir a nivel nacional y/o regional. Es más, el conocimiento de la naturaleza del proceso de exploración (nivel de esfuerzo y riesgo asociado a cada etapa) permitiría definir un tratamiento adecuado a las inversiones que se efectúen en esta área.

Un segundo problema de interés, para la aplicación de los métodos cuantitativos señalados, dice relación con la evaluación y selección de proyectos de plantas regionales de procesamiento de minerales, públicas o privadas. La experiencia acumulada, hasta la fecha, con la operación de estas plantas regionales en Chile ha sido que: 1) una vez que las plantas comienzan sus operaciones, éstas se convierten en centros dinámicos del desarrollo minero en la región. Nuevas minas y reservas minerales son desarrolladas, las cuales no estaban consideradas en la etapa de pre-factibilidad del proyecto. De este modo, la producción minera excede, habitualmente, el suministro programado de mineral, lo cual, en el caso de ENAMI, ha significado la creación de grandes stocks de mineral, inmovilizando inversiones considerables en inventarios y creando presiones financieras severas, bajo los términos de las obligaciones según las cuales operaba ENAMI y, 2) en la etapa de pre-facti-

bilidad se efectuaron, en otros casos, apreciaciones cualitativas excesivamente optimistas sobre el potencial de suministro de mineral a la planta, lo que se ha traducido, posteriormente, en la construcción de plantas regionales sobre dimensionadas (Henríquez, 1974).

Ambas experiencias de asignación, no óptima de recursos escasos, ilustran la necesidad de desarrollar un marco de análisis económico que con-

temple la estimación cuantitativa del potencial minero de la región en estudio, para la etapa de pre-factibilidad del proyecto de planta regional. La aplicación de alguno de los tipos de modelos revisados en este trabajo representaría una contribución significativa al problema planteado (en el Anexo a este trabajo se presenta una solución simple a este problema).

CONCLUSIONES

La necesidad de contar con apreciaciones cuantitativas del potencial de recursos extractivos es más urgente hoy día debido a las demandas mundiales de minerales y energía, rápidamente crecientes. En estas circunstancias, las agencias gubernamentales deben responder a los requerimientos de información relacionados con el adecuado uso de estos recursos, para satisfacer las demandas. No basta con saber que el fenómeno de ocurrencia mineral no está completamente entendido, o que la información disponible es insuficiente para proporcionar una confiabilidad de las estimaciones alta o ni siquiera moderada. La apreciación de los recursos minerales debe efectuarse, a menudo, a pesar de estos obstáculos. Por otra parte, las apreciaciones cualitativas sobre las posibilidades de descubrir depósitos minerales en un área determinada representan una ayuda muy limitada para las agencias gubernamentales, cuando éstas tienen que definir y/o implementar políticas mineras que conduzcan a la obtención del nivel óptimo de utilización de los recursos minerales. Estas apreciaciones cualitativas, tampoco sirven a las empresas mineras modernas que efectúan

exploración regional de minerales (Culbert, 1976).

El problema de interés no es, por lo tanto, si se debe o no emplear estas técnicas, sino cual de estos métodos cuantitativos, que se han desarrollado en las últimas décadas, se adapta en mejor forma a las condiciones existentes y a los objetivos planteados. Los métodos cuantitativos incluyen los modelos puramente espaciales (útiles para una primera aproximación de la estimación del potencial minero) y los métodos basados en modelos geomatemáticos (que cuantifican la información geológica disponible), y en modelos de probabilidades subjetivas (que emplean la geología interpretada por los geólogos mismos). Estos últimos métodos han encontrado una mayor aplicación en la definición, por parte de empresas mineras activas en exploración, de perspectivas conceptualmente superiores para alcanzar sus objetivos. En el contexto nacional, la aplicación diferenciada de estos modelos puede contribuir significativamente a la definición de políticas mineras objetivas y a mejorar el nivel de información para la toma de decisiones en oportunidades de inversión pública o privada.

REFERENCIAS

- AGTERBERG, F. 1971. A probability index for detecting favorable geological environments. *Proceedings, 9th APCOM International Symposium, Montreal*.
- AGTERBERG, F.; DAVID, M. 1979. Statistical Exploration. Sección 4, Capítulo 4. *Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry*. A. Weiss, ed., A.I.M.E.
- AGTERBERG, F. 1975. Statical models for the regional occurrence of mineral deposits. *Proceedings, 13th APCOM International Symposium, Universidad Técnica Clausthal, Alemania Federal*.
- AGTERBERG, F.; KELLY, A. 1971. Geomathematical methods for use in prospecting. *Canadian Mining Jour.*
- ALLAIS, M. 1957. Method of appraising economic prospect of mining exploration over large territories. Algerian Sahara case study. *Management Science*, Vol. 3, N° 4.
- BRANT, A. 1968. The pre-evaluation of the possible profitability of exploration prospects. *Mineralium Deposita*, Vol. 3, N° 1, Berlín.
- BYRNE, R. 1969. A study and model of the exploration process in the non-fuel mineral industry. *ONSAID*

- Research Corp., P.B. 188-526, U.S. Dept. of Commerce.
- CRUZAT, A.; MEYER, W. 1974. Predicted Base-Metal Resources of Northwest England. Section B. Transaction. Institution of Mining and Metallurgy, Vol. 83.
- CULBERT, R. 1976. A multivariate approach to mineral exploration. CIM Bulletin, Vol. 69, N° 766.
- CHUNG, C. 1977. An application of discriminant analysis for the evaluation of mineral potential. Proceedings, 14th APCOM International Symposium, R. Ramani, ed., A.I.M.E., Nueva York.
- DE GEOFFROY, J.; WIGNALL, T. 1970. Statistical decision in regional exploration: application of regression classification analysis in the Southwest Wisconsin Zinc Area. Economic Geology, Vol. 65, N° 7.
- FABRI, A. 1975. Design and Structure of Geological Data Banks for Regional Mineral Potential Evaluation. CIM Bulletin, Vol. 68, N° 760.
- FAVINI, G.; ASSAD, R. 1979. An optimized decision model for area selection in massive sulphide exploration. CIM Bulletin, Vol. 72, N° 804.
- GRIFFITHS, J.; SINGER, D. 1972. The Engel simulator and the search for uranium. Proceedings, 10th APCOM International Symposium, Johannesburg.
- HARRIS, D. 1967. Operation research and regional mineral explorations. Transactions A.I.M.E.
- HARRIS, D. 1968. Potential mineral resources of Seward Peninsula, Alaska. An evaluation of geostatistic and computer simulation. M.I.R.L. Bulletin, N° 18, University of Alaska.
- HARRIS, D. 1969. Quantitative methods, computer, reconnaissance geology and economics in the appraisal of mineral potential. In A decade of digital computing in the mineral industry, A. Weiss, ed., A.I.M.E., Nueva York.
- HARRIS, D. 1973. A subjective probability appraisal of metal endowment of Northern Sonora, Mexico. Economic Geology, Vol. 67 N° 12.
- HARRIS, D. y otros. 1970. The methodology employed to estimate potential mineral supply of the Canadian Northwest. An analysis based upon geologic opinion and system simulation. Mineral Information Bulletin, MR105, Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa.
- HARRIS, D.; BROCK, T. 1973. A conceptual bayesian geostatistical model for metal endowment: A model that accepts varying levels of geologic information, with a case study. Proceedings, 11th APCOM International Symposium, University of Arizona.
- HARRIS, D.; EURESTY, D. 1972. The impact of transportation network upon the potential supply of base and precious metals from Sonora, Mexico. Proceedings, 10th APCOM International Symposium, Johannesburg.
- HENRIQUEZ, L. 1974. A cost-benefit analysis of a custom mill for small copper mines in Northern Chile. M. Eng. Thesis, Mc Gill University, Montreal.
- KELLY, A.; SHERIFF, W. 1969. A statistical examination of the metallic mineral resources of British Columbia. Proceedings Symposium Decision Making in Mineral Exploration II, University of British Columbia, Canada.
- ODEPLAN. 1977. Estrategia nacional de desarrollo económico y social. Políticas de largo plazo. Presidencia de la República. Chile, Santiago.
- PETERS, W. 1978. Exploration Programs. Capítulo 18. Exploration and Mining Geology. John Wiley Sons, ed., Nueva York.
- SARMA, D. 1979. An Exploration Strategy for Prospecting with a Case Study on Copper Prospects at Ingaldhal (India). Mineralium Deposita, Vol. 14, N° 3.
- SINCLAIR, A.; WOODSWORTH, G. 1970. Multiple regression as a method of estimating exploration potential in an area near Terrace, B.C. Economic Geology, Vol. 65, N° 8.
- SLICHTER, L. y otros. 1962. Statistics as a guide to prospecting. Proceedings 3th APCOM Symposium, University of Arizona.
- UMAR, P. 1978. Mineral Resource Potential. Rouyn-Noranda Region, Quebec. Ph. D. Thesis, Mc Gill University, Montreal.

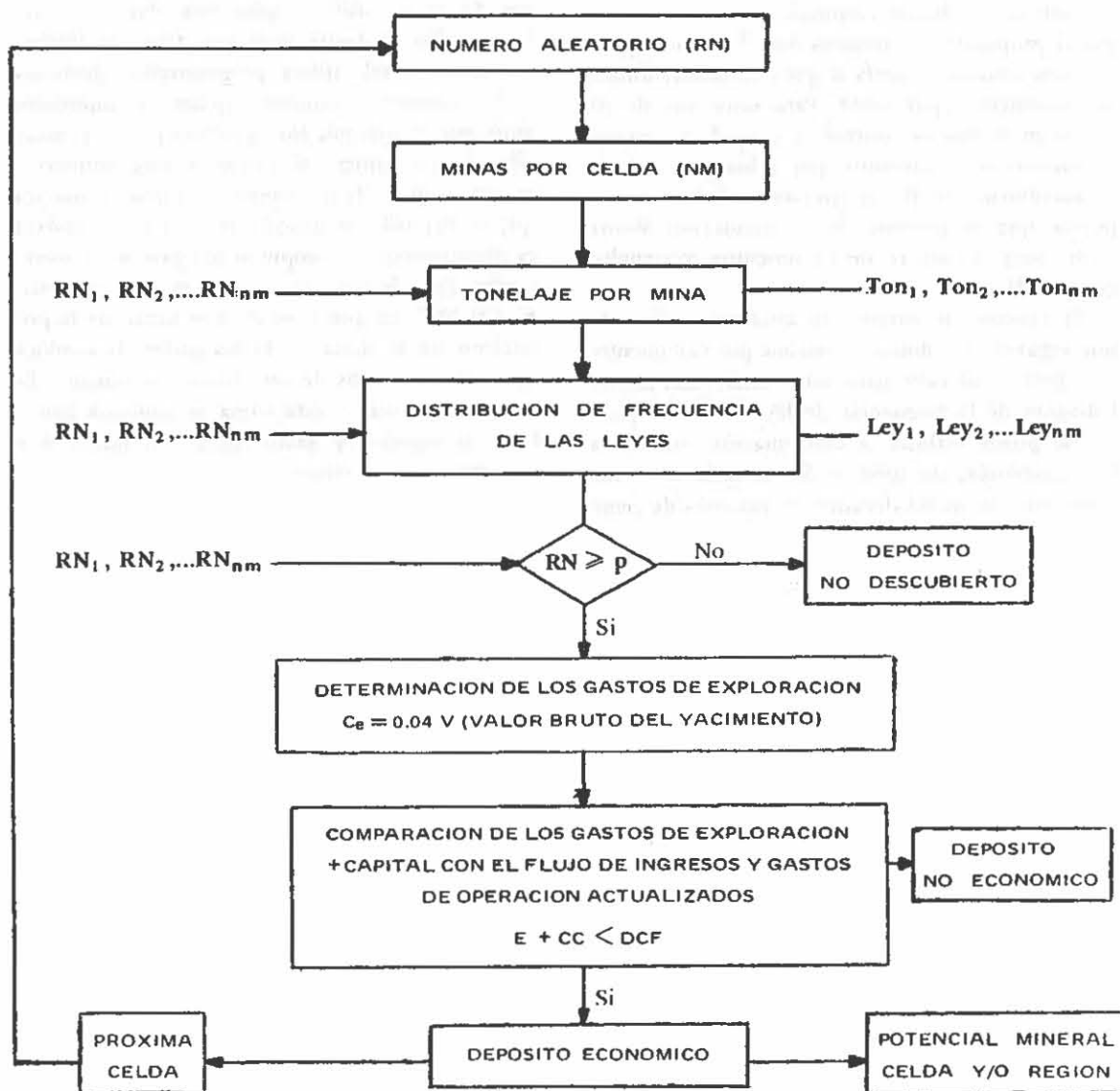
APENDICE I

EJEMPLO DE APLICACION DE UN MODELO ESPACIAL PARA ESTIMAR EL
SUMINISTRO POTENCIAL DE MINERALES A UNA PLANTA REGIONAL DE
PROCESAMIENTO DE MINERALES

Se ha elegido, en razón a su simplicidad, un modelo espacial para ilustrar la aplicación de estos modelos a un caso de interés nacional. La aplicación de modelos geomatemáticos sería, sin duda,

más conveniente para proporcionar una estimación de los depósitos de cobre que abastecerían una planta regional. Sin embargo, si se carece de información geológica suficiente y no existe la

FIG. 2. Análisis Espacial por Simulación.



posibilidad de consultar expertos, el uso de modelos espaciales proporciona información acerca del potencial de recursos minerales explotables, que sirve como una primera aproximación al problema.

Como base para realizar esta aplicación, se recomienda seleccionar un área bien explorada, la cual servirá como área de control. Se estima que esta área de control consistiría en una superficie de 12.544 kms² (IGM cuadrángulos), la cual se dividiría en celdas (subdivisiones de 7 kms²). Se asignaría a estas celdas valores de producción en base a las reservas de mineral de los depósitos conocidos. Se puede usar como distribución de probabilidades la frecuencia de distribución relativa, (suposición válida sólo si el número de las observaciones recolectadas es suficientemente grande).

La Figura A1 muestra un diagrama esquemático de la simulación empleada en el modelo espacial propuesto. La primera distribución empleada en la simulación sería la que expresa el número de yacimientos por celda. Para cada una de las celdas en el área de control, se procede a registrar el número de yacimientos por celda y se calcula la distribución de frecuencias acumuladas. La respuesta que se obtiene de la simulación Monte Carlo, será el número de yacimientos contenidos en la celda.

El proceso de simulación continúa utilizando una segunda distribución, tonelaje por yacimiento, para generar un valor para cada yacimiento. La distribución de la frecuencia de leyes de los depósitos se puede estimar, a continuación, en base a las estadísticas de producción de mineral y del contenido de metal durante un período de tiem-

po suficientemente largo.

Para evaluar el suministro potencial de mineral de cobre a una planta regional, la simulación supone que todos los depósitos de la celda son conocidos y se excluyen los gastos de exploración con el objeto de determinar una medida inicial del valor de cada depósito. Aquellos depósitos con un valor actualizado neto esperado no negativo (después de la deducción de la inversión inicial, sin incluir los gastos de exploración), son los depósitos seleccionados para la prospección.

La estimación de la inversión requerida en infraestructura (nuevos caminos de acceso) y los costos de transporte para trasladar el mineral desde la mina a la planta de beneficio se puede efectuar mediante una simulación que registre, en forma digital, la información disponible en los mapas. Se puede utilizar, para este objeto, un modelo similar al desarrollado por Harris y Euresty (1972), el cual utiliza programación dinámica.

En resumen, el modelo espacial de simulación propuesto contempla los siguientes pasos: 1) selección de un número aleatorio; si este número es mayor o igual a la probabilidad de descubrimiento (p), el depósito es descubierto; 2) si el depósito es descubierto, se computan los gastos en exploración (E) de acuerdo a la siguiente relación: $E = 0,04V$, en que V es el valor bruto de la producción de la mina; y 3) los gastos de exploración, determinados de este modo, se suman a los costos de capital y esta suma se compara con el flujo de ingresos y gastos para determinar si el depósito es económico.

