

## EVALUACION DE LOS RECURSOS MINERALES DE COSTA RICA

D.A. Singer, Norman J. Page, W.C. Bagby, D.P. Cox, and Steve Ludington  
U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Road, Menlo Park, CA 94025, USA

### PREFACIO

Desde la publicación del folio EVALUACION DE LOS RECURSOS MINERALES DE LA REPUBLICA DE COSTA RICA (U.S. Geological Survey, 1987) ha habido bastante progreso tanto en la exploración como también en el desarrollo de la industria minera en Costa Rica. Cuando se nos pidió el permiso para reimprimir el capítulo de "Evaluación de los recursos minerales", que forma parte de la mencionada publicación, realizamos algunos cambios menores, especialmente en los párrafos sobre los depósitos de oro de placer y de oro de fuentes termales. Muchos de los datos específicos básicos para las conclusiones presentadas en este artículo, especialmente las localidades geográficas y las descripciones de los yacimientos, están en la publicación EVALUACION DE LOS RECURSOS MINERALES DE LA REPUBLICA DE COSTA RICA (U.S. Geological Survey, 1987).

La presente investigación fue patrocinada por el Laboratorio Nacional de Los Alamos, gracias a un proyecto del Programa de Recursos Energéticos de América Central de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID). La investigación se llevó a cabo en cooperación con el Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas y la Universidad de Costa Rica.

Agradecemos a Dr. Siegfried Kussmaul y Dr. Jorge Laguna M., Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, la revisión y corrección del texto en Español.

### INTRODUCCION

La evaluación de los recursos minerales es el producto de la cuidadosa interpretación y evaluación de informaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas, obtenidas durante el estudio integral de un área. La evaluación de los recursos minerales de Costa Rica se realizó en tres etapas: (1) la delineación de los dominios que permiten la ocurrencia de tipos específicos de yacimientos; (2) la comparación de los modelos de tonelaje y ley de los yacimientos conocidos en todo el mundo con los tipos de yacimientos identificados en Costa Rica; y (3) la estimación o el cálculo de la caantidad de yacimientos no descubiertos en cada uno de los dominios delimitados. En esta publicación el término "tipo de yacimiento" se define como un modelo representativo de un grupo específico de yacimientos, tal como lo definió Cox & Singer (1986); "manifestación mineral" se usa para describir una localidad específica en la cual las observaciones geológicas y otros datos indican la presencia de una mineralización; y "yacimiento" es una manifestación mineral de tamaño y ley suficientemente alto como para considerarlo como de potencial económico. Este proceso de tres etapas (Singer, 1975) fue aplicado por primera vez en la evaluación de los recursos minerales del cuadrángulo Nabesna en Alaska, a escala de 1:250.000 (Richter et al., 1975). Desde entonces aproximadamente 170.000 km<sup>2</sup> de los EEUU han sido evaluados a escala de 1:250.000 y aproximadamente 2,2 millones km<sup>2</sup> en las Américas a escala de 1:100.000.

## EL PROCESO DE EVALUACION EN TRES ETAPAS

### Delimitación de dominios según el tipo de yacimiento

Los factores considerados en la delimitación de los dominios incluyen la información estratigráfica y tectónica, descripciones litológicas, el ambiente geológico y el tipo o los tipos de yacimientos que pueden presentarse en este ambiente particular (en comparación con los tipos de yacimientos en otros ambientes geológicos similares). En cada caso, los límites de los dominios están dados primeramente por las características geológicas cartografiadas o inferidas. Seguidamente, dichos límites se pueden delinear de nuevo utilizando los resultados de los análisis geoquímicos efectuados en muestras de roca y/o de las exploraciones mineras. Estudios geofísicos, tales como reconocimientos gravimétricos y aeromagnéticos contribuyen a la evaluación, ya que ayudan en la identificación de las rocas cubiertas o en áreas con pocos afloramientos. Los tipos de yacimientos se identifican en base a la litología de la roca huésped y de las rocas asociadas, el contenido de metales, el tonelaje y la ley, los minerales de la mena y el marco geológico. Otra información muy importante en la determinación de los tipos de yacimientos es el inventario de la actividad minera histórica en el área de estudio. Descripciones incompletas o poco exactas de las manifestaciones minerales pueden dificultar la identificación de los tipos de yacimientos. Una vez que han sido identificados los diferentes tipos de depósitos se puede establecer lo que es permisible dentro del dominio. En caso de que se pueda demostrar científicamente que un cierto tipo de yacimiento no puede existir en un terreno, los límites del dominio se ajustan para excluir de él dicho terreno. Para algunos tipos de yacimientos una exploración extensa podría proveer evidencias para excluir ciertos terrenos del dominio; sin embargo, para muchos tipos de yacimientos solamente una red muy densa de perforaciones permite la exclusión de terrenos.

### Modelos de tonelaje y ley

Para la construcción de los modelos de tonelaje y ley se utilizaron las estimaciones de los tonelajes originales (anteriores a la explotación) y las leyes promedias de todos los tipos de yacimientos en todo el mundo que están bien explorados, documentados y descritos. Se utilizaron los modelos mundiales de tonelaje y ley, publicados por Cox & Singer (1986) para estimar los tonelajes y las leyes de los yacimientos no descubiertos de Costa Rica, que se encuentran en ambientes geológicos similares. La variación del tonelaje y la ley de los depósitos que pertenecen a un tipo específico de yacimiento es pequeña en comparación con las variaciones que presentan los depósitos que pertenecen a diferentes tipos.

### Estimación del número de manifestaciones minerales no descubiertas

La estimación del número de depósitos no descubiertos en Costa Rica se indica para unos pocos tipos de yacimiento en forma probabilística, con el fin de demostrar el grado de confiabilidad. Muchos factores, incluyendo datos geológicos, geoquímicos y geofísicos y el grado de la exploración están integrados en estas estimaciones. Los cálculos del número de yacimientos no descubiertos en los dominios delimitados se indican con probabilidades del 90, 50 y 10 por ciento. Por ejemplo, el valor indicado para el 90 % significa el número de yacimientos para los cuales existe una probabilidad del 0,90 que el número de yacimientos es igual o mayor a este valor. Aproximadamente la mitad de los yacimientos no descubiertos deben de tener un tonelaje o una ley mayor que el promedio que resulta de los modelos de tonelaje-ley para el respectivo tipo de yacimiento. Las minas y los prospectos conocidos en Costa Rica no se incluyeron en la estimación de los yacimientos no descubiertos.

## GUIAS Y RECOMENDACIONES PARA LA EXPLORACION

La delimitación de los dominios y la identificación de los tipos de depósitos facilitan la

exploración, porque yacimientos con características físicas, químicas y mineralógicas similares generalmente se presentan a través de todo el mundo, siempre en ambientes geológicos parecidos. Por lo tanto, es importante identificar los diferentes tipos de depósitos en Costa Rica, utilizando los conocimientos de los ambientes geológicos existentes y los tipos de depósitos relacionados con éstos en otras partes del mundo. En la discusión de los dominios seleccionados se incluyen las guías y las recomendaciones para la exploración. Los programas futuros de exploración en Costa Rica deben basarse en una revisión económica mundial de los minerales específicos y deben concentrarse en aquellos dominios que han sido delimitados para cada tipo de depósito.

## LOS TIPOS DE YACIMIENTOS IDENTIFICADOS EN COSTA RICA

### Vetas epitermales del tipo Sado

Las vetas epitermales de oro y plata en Costa Rica son ejemplos del modelo de vetas epitermales del tipo Sado. Este tipo de yacimientos se encuentra dentro de rocas huéspedes volcánicas de composición dacítica, andesítica, latita cuarcífera, riódacítica, riolítica y rocas volcanoclásticas asociadas, todas de un ambiente subaéreo. La mineralización se encuentra generalmente como vetas de relleno a lo largo de fallas con fuerte inclinación. Las rocas del basamento consisten típicamente de secuencias volcánicas o rocas intrusivas más antiguas (Mosier et al., 1986). Los tonelajes de los yacimientos epitermales del tipo Sado (Mosier et al., 1986) son pequeños en comparación con los yacimientos auríferos del tipo fuente termal, roca huésped calcárea (tipo Carlin) y los depósitos epitermales de metales preciosos, pero se traslapan con los tonelajes de los yacimientos de vetas epitermales del tipo cuarzo-alunita y Creede (Fig. 1). Las leyes de oro en los yacimientos epitermales del tipo Sado son similares a las del tipo cuarzo-alunita, se traslapan con las leyes más altas de los yacimientos del tipo Creede y generalmente son mayores que las leyes de los tipos fuente termal y roca huésped calcárea (Fig. 1).

Los dominios D y E delimitan áreas favorables para los yacimientos epitermales del tipo Sado (Fig. 2). Ambos dominios están subyacidos por rocas volcánicas Terciarias con pocas intercalaciones de rocas sedimentarias volcanoclásticas. El dominio D contiene yacimientos epitermales conocidos del tipo Sado, stocks y diques intrusivos someros y domos riolíticos extrusivos. El dominio E se separó del dominio D porque en E faltan las evidencias que permiten el cálculo del número de yacimientos no descubiertos.

Los yacimientos conocidos del tipo Sado en el dominio D muestran que el ambiente geológico en este dominio es favorable para otros depósitos no descubiertos hasta ahora. Estos yacimientos no descubiertos pueden presentarse dentro o fuera de los distritos mineros conocidos. A pesar de que algunas manifestaciones del tipo Sado están ubicadas en áreas que fueron cartografiadas como Formación Monteverde (por ejemplo Río Chiquito, Corinto) estos yacimientos se encuentran cerca del contacto con las rocas volcánicas del Grupo Aguacate (Corinto) o están ubicados en cañones que están cortados a través de las andesitas de la Formación Monteverde (Río Chiquito). Siendo así, los programas de exploración deben considerar la posibilidad de la presencia de yacimientos del tipo Sado en ventanas cortadas a través de las rocas jóvenes, que exponen a las rocas del Grupo Aguacate, a pesar de que la Formación Monteverde no está incluida en el dominio D. Tampoco se ha considerado en este trabajo la probabilidad de encontrar yacimientos no descubiertos en tales ventanas.

En Costa Rica los yacimientos del tipo Sado muestran una relación espacial y posiblemente también genética con las riolitas, y en algunas de las riolitas se encontraron valores de oro hasta 0,6 ppm. La asociación con las riolitas proporcionó una de las bases para el cálculo del número de yacimientos no descubiertos en el dominio D. Fuera de los distritos mineros se conocen por lo menos nueve centros de riolitas. Calculamos que el 50 por ciento de estos pueden tener uno o más yacimientos epitermales del tipo Sado en la periferia. Estas estimaciones las usamos subjetivamente para la determinación del número de yacimientos no descubiertos dentro del dominio D.

GOLD GRADES AND TONNAGES BY DEPOSIT TYPE

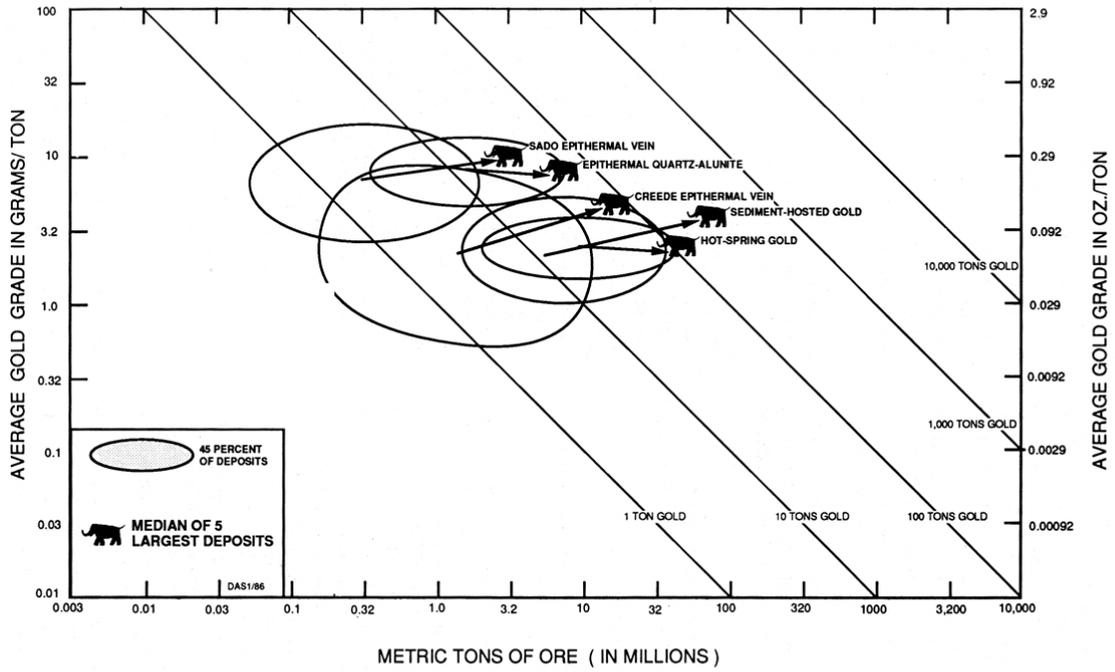


Fig. 1. Comparación de los tonelajes y leyes de oro en diferentes tipos de yacimientos epitermales. Las elipses encierran los tonelajes y leyes de oro del 45 % de los yacimientos de cada tipo. Los elefantes representan el tonelaje y ley promedio de los 5 depósitos más grandes de cada tipo. Los yacimientos epitermales de oro de la Cordillera de Tilarán y los Montes del Aguacate probablemente no son mucho mayores, ni en los tonelajes ni en las leyes, que los promedios mostrados para los yacimientos epitermales del tipo Sado.

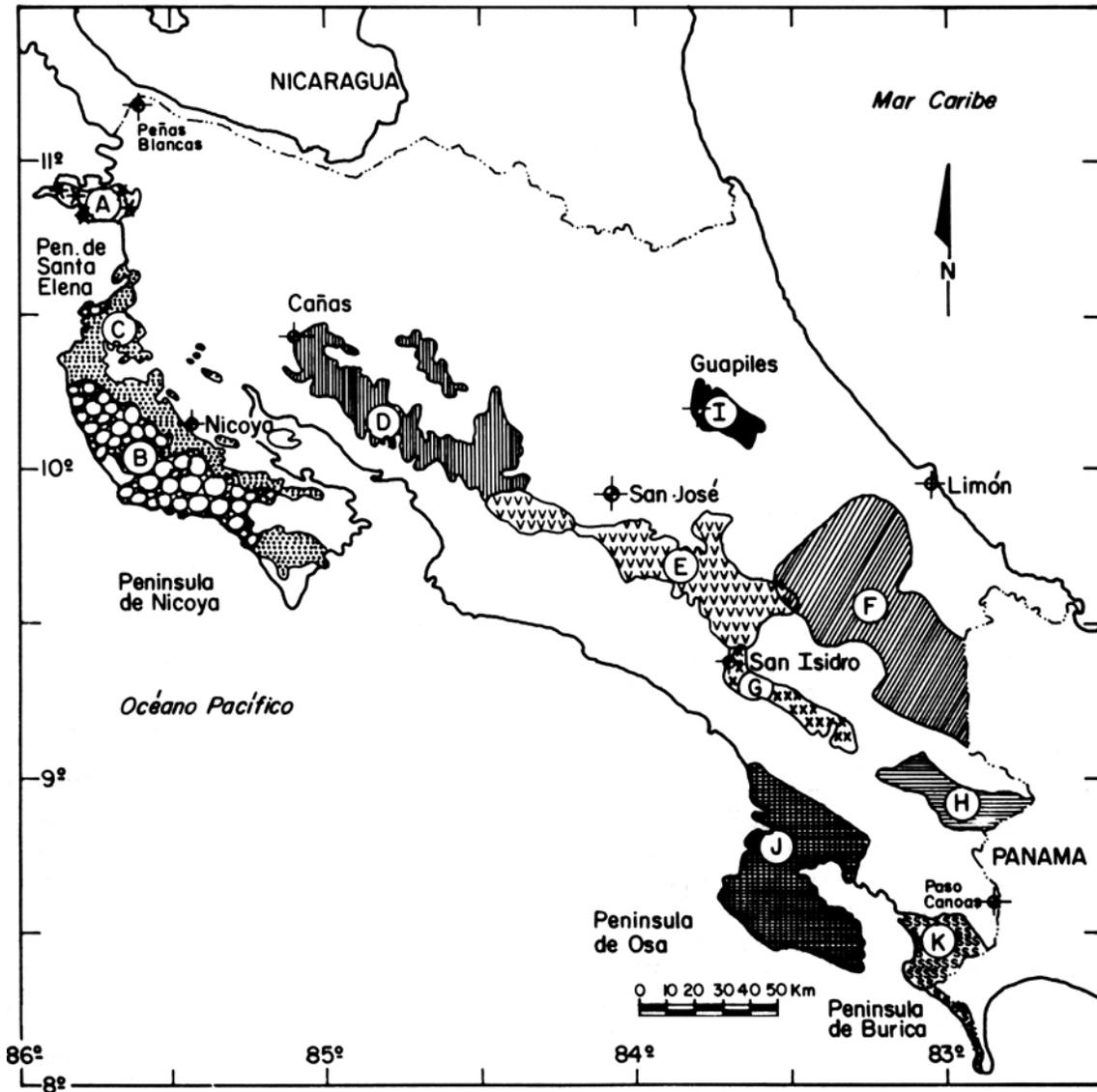


Fig. 2. Mapa de los dominios que fueron delimitados para algunos tipos de yacimientos en Costa Rica. Dominio A: cromita podiforme; Dominio B y C: manganeso volcánogénico y sulfuros masivos del tipo Chipre; Dominios D y E: vetas epitermales del tipo Sado; Dominio F: cobres porfíricos; Dominios G, H e I: bauxita laterítica; Dominios J y K: placeres de oro.

La formación de yacimientos epitermales está estrechamente ligada a la convección de fluidos hidrotermales provocada por la presencia de una fuente de calor cercana. Generalmente se consideran a los magmas debajo de los centros volcánicos como las fuentes de calor. Estimamos que durante el período de la formación de los yacimientos de oro existían como mínimo 18 centros volcánicos en el dominio D. Es probable que menos de la mitad de éstos podrían haber proporcionado el calor suficiente para desarrollar unos sistemas de convección de aguas hidrotermales cargadas de metales. Esta proporción también se utilizó para estimar el número de yacimientos no descubiertos en el dominio D.

En el dominio E, al sureste del dominio D, también afloran riolitas Terciarias. Sin embargo, sólo una manifestación epitermal (?) de oro ha sido encontrado cerca de Pejibaye; se trata de un tipo de depósito no identificado que no está asociado a riolitas. Las intrusiones que se presentan en el dominio E son dioritas cuarzosas y granodioritas equigranulares las cuales indican un nivel de erosión más profundo que en el caso de las riolitas del dominio D. El límite noroeste del dominio E coincide con el Río Grande de Tárcoles y representa la extensión hacia el sureste del dominio D que incluye la mayoría de los yacimientos epitermales del tipo Sado. El límite sureste del dominio E se puso donde la información geológica es insuficiente como para permitir la inclusión de otras rocas volcánicas Terciarias dentro del dominio. Sin embargo, la presencia de rocas volcánicas Terciarias al sureste del dominio E indica que dicha área no se debe omitir completamente como un posible blanco para la exploración de metales preciosos epitermales. A pesar de que las rocas volcánicas Terciarias se extienden hasta el dominio E, el ambiente geológico no es tan favorable para yacimientos del tipo Sado como lo es en el dominio D. Esto debido a la falta de yacimientos conocidos, la falta de intrusiones riolíticas y el nivel de erosión más profundo, probablemente por debajo del ambiente de las mineralizaciones epitermales. Debido a esto no se hizo ninguna estimación del número de yacimientos no descubiertos dentro del dominio E.

Las estimaciones del número de yacimientos del tipo Sado no descubiertos hasta ahora en Costa Rica están restringidas al área del dominio D. El cálculo se hizo en base a la compilación del número de yacimientos conocidos, el número de cuerpos riolíticos, el número de centros volcánicos y una interpretación del modelo de tonelaje y ley para los yacimientos epitermales del tipo Sado. El cálculo se refiere a los yacimientos no descubiertos que se ubicarían sobre las curvas de distribución de tonelaje y ley, presentadas en las figuras 3A y 3B. Estimamos que hay una probabilidad del 90 % de que existan 4 yacimientos no descubiertos, del 50 % de que sean 11 y una probabilidad del 10 % de que el número de yacimientos sea 17 o más.

La zonación geológica que presentan los depósitos y manifestaciones del tipo Sado, representada por los patrones de las vetas, puede ayudar en la ubicación de nuevos prospectos en cuanto a la profundidad o el desplazamiento lateral. La presencia de zonas alargadas con pequeñas vetillas tabulares ("sheeted veins") compuestas de cuarzo y piritita indica que el prospecto está en un nivel superior dentro del sistema de vetas y está encima o al lado de una veta por relleno de fisura. Los prospectos que contienen zonas con vetillas tabulares paralelas a una veta por relleno mayor, también representan un nivel relativamente alto dentro del sistema. Al contrario, las zonas de vetillas tabulares que buzan hacia una veta grande de relleno indican que nos encontramos en un nivel más profundo del sistema. Estas observaciones son importantes porque los niveles más superficiales del sistema son más ricos en metales preciosos que los niveles profundos.

Los yacimientos epitermales del tipo Sado exhiben algunas características geoquímicas y de alteración hidrotermal que ayudan en la exploración. Los datos geoquímicos, combinados con análisis estructurales y el conocimiento de los patrones de las vetas forman una herramienta importante para la exploración. Los patrones de alteración típicamente incluyen una silicificación intensiva, formación de vetillas de cuarzo y una arcillitización. Los análisis geoquímicos de rocas pueden ayudar en la ubicación de la manifestación dentro del sistema hidrotermal. Valores

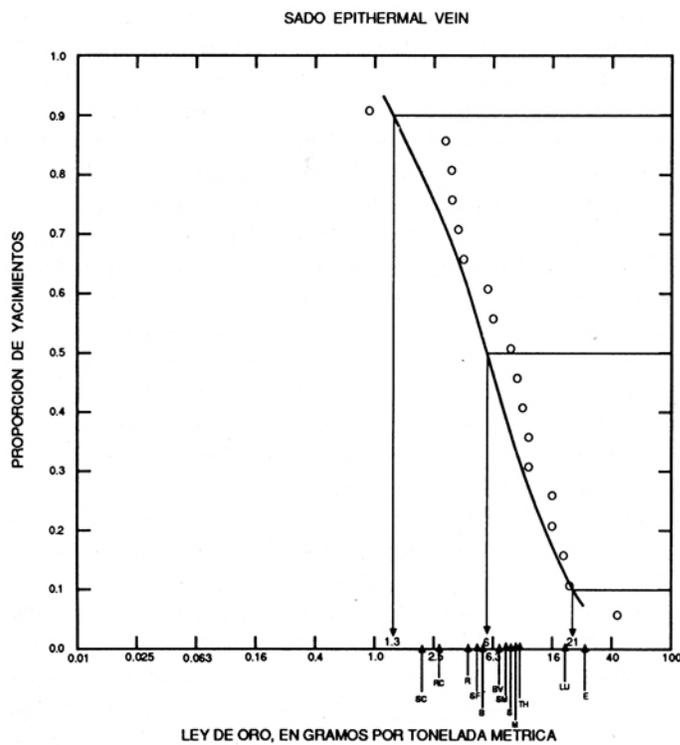
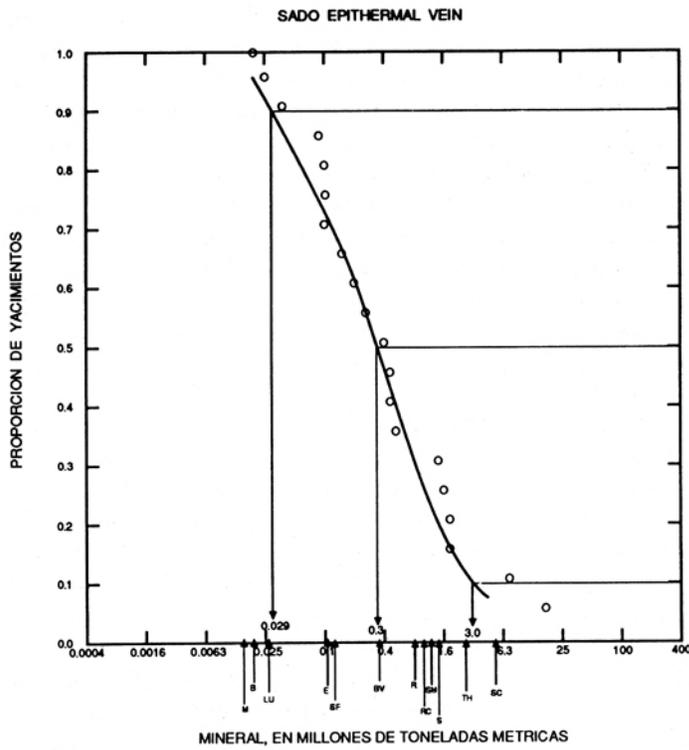


Fig. 3. Modelos de tonelaje y ley establecidos en base a 20 depósitos de vetas epitermales del tipo Sado provenientes de todo el mundo (Cox & Singer, 1986). Los tonelajes y leyes están representados sobre el eje-x, la frecuencia acumulativa de los depósitos sobre el eje-y. Para los tonelajes y leyes se utiliza una escala logarítmica. Cada círculo representa un yacimiento. Las curvas suavizadas fueron dibujadas utilizando los valores medios y las desviaciones estándar de los datos. Se construyeron las intersecciones de la curva con los porcentajes de 90, 50 y 10. Los datos de Costa Rica fueron tomados de U.S. Geological Survey (1987) y comparados con el modelo generalizado. B: Beta Vargas; BV: Bellavista; E: Esperanza de Líbano; LU: La Unión; M: Moncada; R: Río Cañamazo; S: Silencio; SC: Santa Clara; SF: Sacra Familia; SM: San Martín; TH: Tres Hermanos. A: Distribución de los tonelajes de los depósitos epitermales del tipo Sado. Las flechas indican los tonelajes originales de los depósitos auríferos en la Cordillera de Tilarán y los Montes del Aguacate. B: Distribución de la ley de oro en los depósitos epitermales del tipo Sado. Las flechas indican las leyes originales en los depósitos auríferos epitermales de Costa Rica.

anómalos de oro, mercurio y talio, juntos con valores relativamente bajos de metales básicos, indican un nivel relativamente alto dentro del sistema hidrotermal. Valores muy altos de los metales básicos y del arsénico junto con valores bajos de mercurio y telurio indican una posición profunda dentro del sistema. La alta densidad de vetas y vetillas de cuarzo generalmente provoca una silicificación de la roca caja. La alteración sericitica por lo general se presenta cerca de las vetas de cuarzo. El cartografiado geológico y el muestreo geoquímico indican que los valores más altos de oro y plata se encuentran en las vetas de cuarzo. Por eso, la determinación de la estructura zonal que presentan las vetas y que se manifiesta por la distribución espacial de la alteración silíceo y sericitica, ayudan a la identificación de lugares apropiados para las perforaciones. El reconocimiento de la relación espacial que existe entre las concentraciones de los elementos traza que varían hacia la profundidad y la orientación de las vetillas, tanto entre sí como en relación con una veta principal, constituyen uno de las mejores guías para la exploración. En vista de que el oro es más abundante en las partes superficiales de un sistema hidrotermal es importante determinar el grado de erosión de cada prospecto, utilizando el cartografiado geológico y el muestreo geoquímico.

Hesselbom (1985) realizó estudios geofísicos con los métodos del autopotencial magnético, polarización inducida, resistividad y electromagnético a través de vetas de cuarzo con metales preciosos, ubicadas dentro de rocas andesíticas en Nicaragua. Los métodos electromagnéticos resultaron los mejores para la localización de filones cubiertos. El blanco geofísico era la zona con alta conductibilidad adyacente a las vetas. Resultados similares fueron obtenidos por Middleton & Campbell (1979) quienes utilizaron las anomalías geofísicas y geoquímicas para buscar vetas en Nicaragua. Las similitudes geológicas entre los yacimientos auríferos de Nicaragua y Costa Rica hacen suponer que los métodos electromagnéticos podrían ser también útiles en las exploraciones en Costa Rica. Métodos geofísicos pueden ser útiles para determinar la extensión de sistemas conocidas de vetas o para encontrar vetas cubiertas en distritos mineros conocidos.

En Costa Rica los yacimientos auríferos están asociados espacial y genéticamente a rocas riolíticas. Muchas de las intrusiones riolíticas están silicificadas y forman elevaciones topográficas con formas circulares (domos e intrusiones) o lineales (diques). Estos patrones se distinguen bien en las fotografías aéreas y son excelentes guías regionales para la exploración regional. Una combinación de características favorables de alteración hidrotermal, anomalías geoquímicas y geofísicas definirá los blancos para las perforaciones.

#### **Los yacimientos de cromita podiforme**

Los yacimientos del tipo de cromita podiforme consisten en masas lenticulares de cromita dentro de las rocas ultramáficas de complejos ofiolíticos. Los yacimientos están restringidos a cuerpos de dunita dentro de harzburgitas tectonizadas y (o) a las partes inferiores de cumulatos ultramáficos que generalmente están serpentinizados (Albers, 1986). Los tonelajes de los yacimientos de cromita podiforme que se conocen en Costa Rica son bastante pequeños; sin embargo, las leyes son comparables con las de yacimientos similares al oeste de los Estados Unidos (Fig. 4 A, 4B; Singer & Page, 1986).

Los yacimiento de cromita podiforme se presentan en la Península de Santa Elena. Esta área ha sido determinada como dominio A. Se supone que las rocas ultramáficas se extienden más hacia el este donde están cubiertos por rocas más jóvenes, ya que esta área presenta las mismas características aeromagnéticas como las rocas ultramáficas expuestas. Las observaciones de campo indican que en el dominio A existen rocas ultramáficas tanto de origen tectónico como de diferenciación gravitativa, pero como el área no ha sido cartografiado en detalle no se la puede subdividir más.

En el dominio A solamente se conocen nueve yacimientos de cromita podiforme; la mayor parte de éstos aflora a lo largo de la cresta de la Península de Santa Elena y siguen aproximadamente una dirección este-oeste. Cada uno de los nueve depósitos tiene un tonelaje menor que el valor promedio del modelo de tonelaje y ley

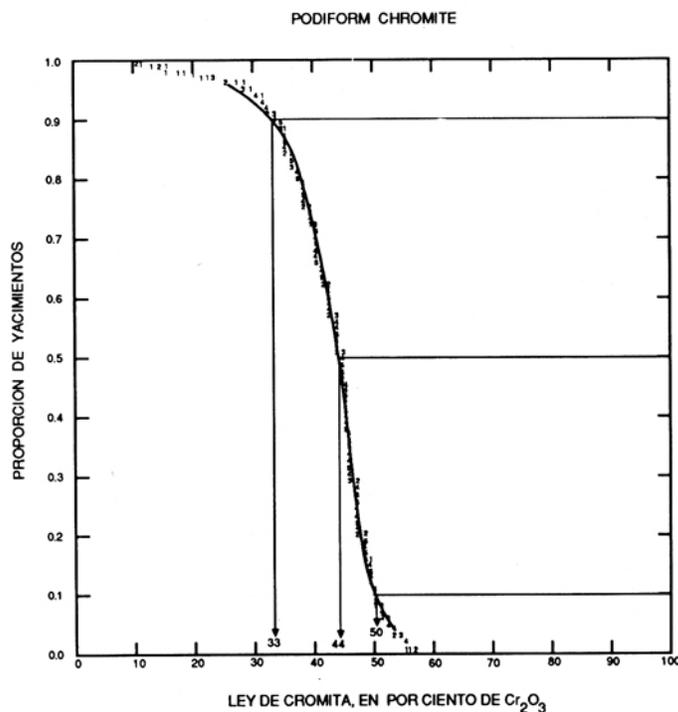
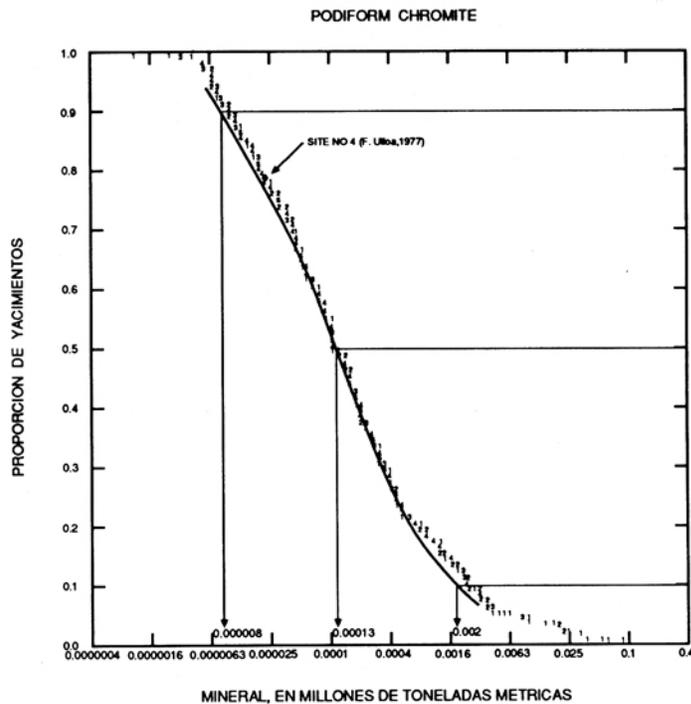


Fig. 4. Modelos de tonelaje y ley (en por ciento) para algunos tipos de yacimientos. Todos los gráficos muestran los tonelajes o leyes en el eje-x y la frecuencia acumulativa de los depósitos en el eje-y. Los gráficos de un mismo mineral se presentan en una misma escala; se utilizó una escala logarítmica para los tonelajes y la mayoría de las leyes. Cada círculo representa un yacimiento (raras veces un distrito minero); están ordenados por tonelaje y ley ascendente. Las curvas suavizadas fueron dibujadas utilizando los valores medios y las desviaciones estándar de los datos. Se construyeron las intersecciones de la curva con los porcentajes de 90, 50 y 10. Para los tonelajes y la mayoría de las leyes las curvas suavizadas representan los porcentajes de una distribución lognormal, con los mismos valores de promedio y de desviación estándar que los yacimientos estudiados. Se comparan los yacimientos de Costa Rica (rombos) con los modelos generales de tonelaje y ley modificados de Cox & Singer (1986). Los datos de Costa Rica fueron tomados de U.S. Geological Survey (1987). A: Modelo de tonelaje de los yacimientos del tipo cromita podiforme, basado en 435 depósitos en California y Oregón (EEUU). B: Modelo de ley de los yacimientos del tipo cromita podiforme, basado en 435 depósitos en California y Oregón (EEUU).

establecido con yacimientos de todo el mundo (Fig. 4A). Si asumimos que generalmente los depósitos más grandes son los que primero se encuentran, entonces los tonelajes de los yacimientos no descubiertos en el dominio A también deben de estar por debajo del promedio del modelo. Estadísticas no publicadas sobre los yacimientos de cromita en California y la extensión del dominio A (250 km<sup>2</sup>) permiten calcular que hay una probabilidad del 90 % de que existan cero yacimientos no descubiertos en Santa Elena, 50 % de que hay 13 y 10 % de probabilidad de que se podrían encontrar 63 o más nuevos yacimientos.

Casi todos los yacimientos de cromita en el mundo fueron encontrados durante la prospección en superficie. Métodos geofísicos y geoquímicos tuvieron éxito en muy pocos lugares. Debido al tonelaje bajo de los yacimientos de cromita podiforme en Costa Rica, éstos no son prospectos económicamente atractivos. Sin embargo, la prospección más efectiva de las cromitas podiformes será siempre el cartografiado geológico detallado de las rocas ultramáficas con el fin de ubicar los cuerpos duníticos.

#### **Yacimientos de manganeso volcanogénico**

Los yacimientos de manganeso volcanogénico forman lentes y cuerpos estratiformes compuestos de óxidos, carbonatos y silicatos de manganeso dentro de secuencias volcano-sedimentarias. Las rocas huéspedes de los lentes de manganeso dentro de las secuencias volcano-sedimentarias son radiolaritas, lodolitas, grauvacas, tobas, jaspe y basaltos. Los yacimientos de manganeso volcanogénico típicamente se presentan en un ambiente ofiolítico, pero localmente se los encuentra también en ambientes de arco de isla y montes submarinos (Koski, 1986). Los tonelajes de los yacimientos tienden a ser muy bajos en todo el mundo (Fig. 4C) y las leyes (Fig. 4D) son parecidas a las de los otros tipos de yacimientos de manganeso (Mosier, 1986a).

Los dominios B y C en la Península de Nicoya contienen yacimientos de manganeso volcanogénico dentro de basaltos, radiolaritas y cerca del contacto entre el basalto y la radiolarita.

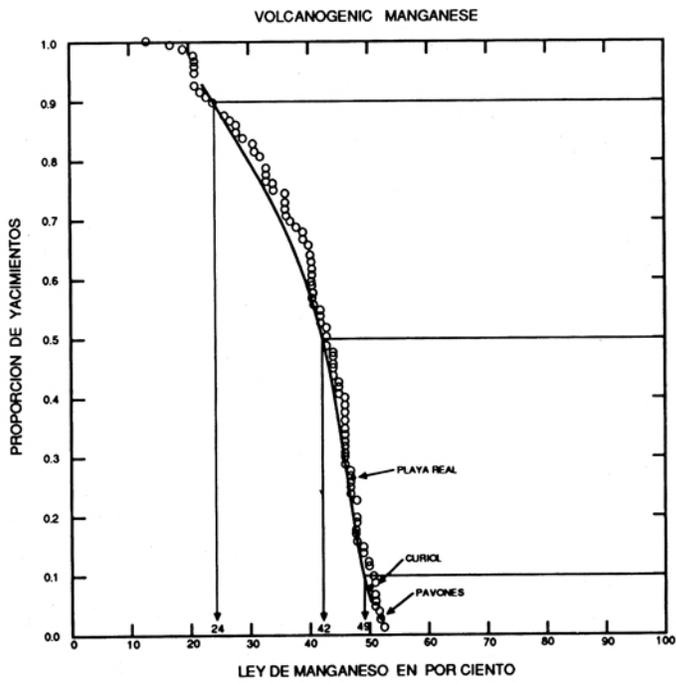
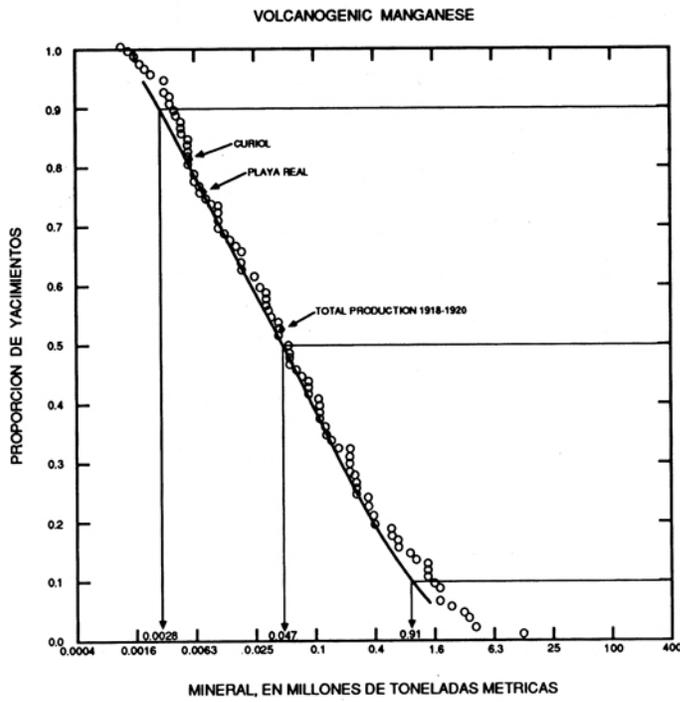
Los dominios B y C se delimitan basándose en los afloramientos de los basaltos submarinos y de las intrusiones máficas, descripciones estratigráficas de los pedernales radiolaríticos interestratificados y las mineralizaciones conocidas de manganeso

Dentro de los dominios B y C se conocen más de 90 manifestaciones de manganeso volcanogénico, pero solamente los yacimientos de Playa Real y Curiol son lo suficientemente grandes para acomodarse sobre la curva de distribución de los tonelajes de este tipo de yacimiento en otras partes del mundo. Es probable que la mayor parte de las manifestaciones que afloran en la superficie han sido encontrados; sin embargo, es posible que existen todavía yacimientos cubiertos con características similares de tonelaje y ley.

#### **Yacimientos de magnetita en placeres de playa**

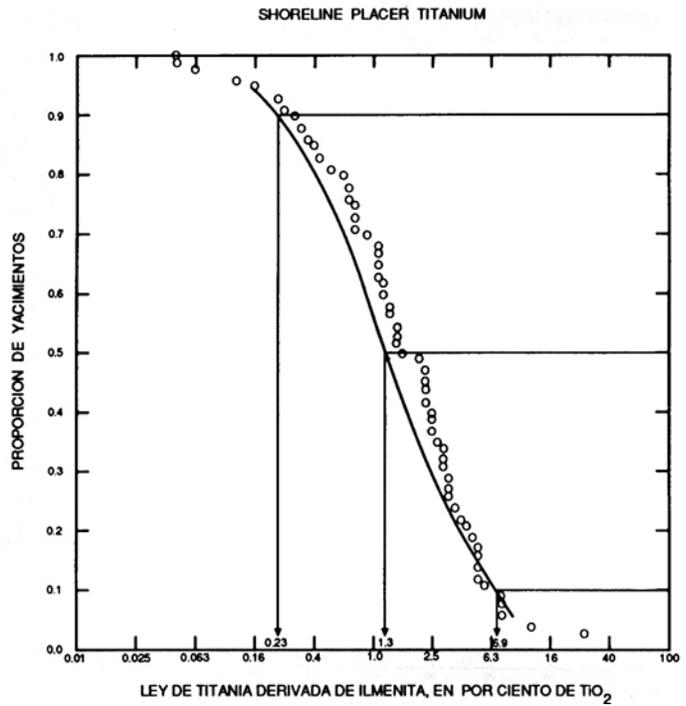
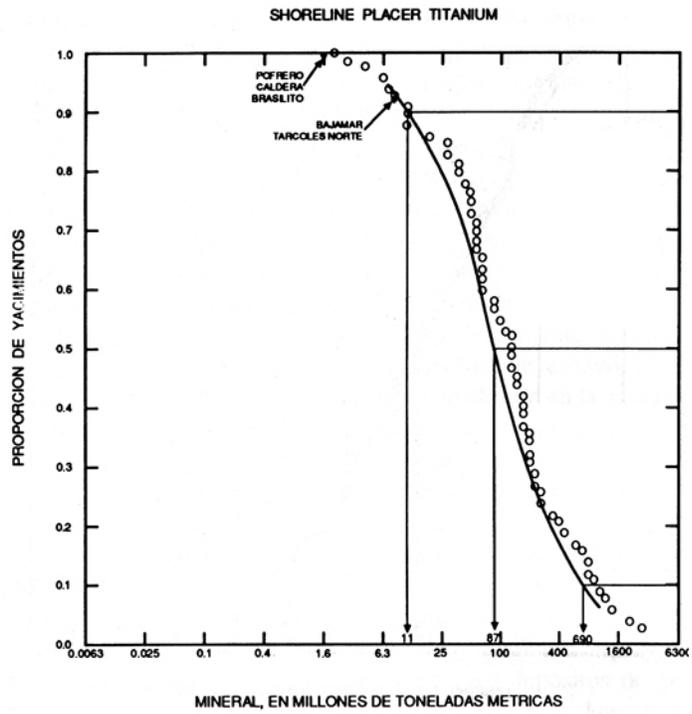
Attanasi & DeYoung (1986) definieron un tipo de depósito de placer de titanio en las playas, el cual se puede aplicar a los depósitos de las arenas magnetíticas de Costa Rica. En el presente trabajo se define este tipo de depósito como yacimientos de placeres de magnetita en las playas. La mayor parte de las manifestaciones de arenas magnetíticas en Costa Rica han sido identificadas, pero como la concentración de la magnetita en las arenas no es muy alta, este tipo de depósito actualmente no es competitivo en el mercado mundial (E.R. Force, comunicación oral, 1986) y por eso no se delimitaron dominios. Los tonelajes estimados de las manifestaciones de magnetita en Costa Rica se comparan con el modelo de depósitos de placer en otras partes del mundo (Fig. 4E). Las leyes de TiO<sub>2</sub> en Costa Rica son parecidas a las del TiO<sub>2</sub> dentro de la ilmenita (Fig. 4F).

La magnetita y los otros minerales pesados se separan de las rocas por los procesos de meteorización y se concentran por el transporte en las playas. La magnetita típicamente se presenta en arenas bien clasificadas, de grano medio hasta fino, formando dunas y playas que sobreyacen a otros sedimentos someros de origen marino. La arena está compuesta por magnetita, ilmenita y rutilo, localmente se encuentra también circón y



C: Modelo de tonelaje de los depósitos de manganeso volcánico, basado en 93 yacimientos a través de todo el mundo.

D: Modelo de ley de los depósitos de manganeso volcánico, basado en 93 yacimientos a través de todo el mundo.



E: Modelo de tonelaje de placeres de magnetita en la playa, basado en 61 yacimientos a través de todo el mundo.  
 F: Modelo de ley de  $TiO_2$  de la ilmenita en los placeres de magnetita en la playa, basado en 61 yacimientos a través de todo el mundo.

trazas de monacita y piroxenos (Force, 1986). Los estudios anteriores de los placeres revelaron la presencia de abundante magnetita en las playas de la Península de Nicoya (Organización de los Estados Americanos, 1978). Los minerales pesados fueron separados de una sola muestra (1,5 kg) de arena negra, recolectada en la playa cerca de Caldera. La fracción de magnetita constituye el 33,4 % del peso del concentrado y contiene 8,74 % de  $TiO_2$ . Otros minerales con posible valor económico se encuentran en concentraciones muy bajas. La concentración máxima de  $TiO_2$  en la ilmenita, encontrada en una fracción de magnetita, es del 2 %, aunque el estudio visual indica que la cantidad de ilmenita en granos aislados es mucho menor. La cromita, si está presente, constituye menos del 0,3 %, el circón 0,0007 % y el olivino el 3 % del peso. Rutilo, monacita, xenotima, casiterita y oro no se encontraron en el concentrado.

Concluimos que hay pocas posibilidades para la explotación de los placeres de magnetita, porque los tonelajes son muy bajos (Fig. 4E) y el contenido de ilmenita (Fig. 4F) es probablemente demasiado bajo.

#### **Yacimientos de sulfuros masivos del tipo Chipre**

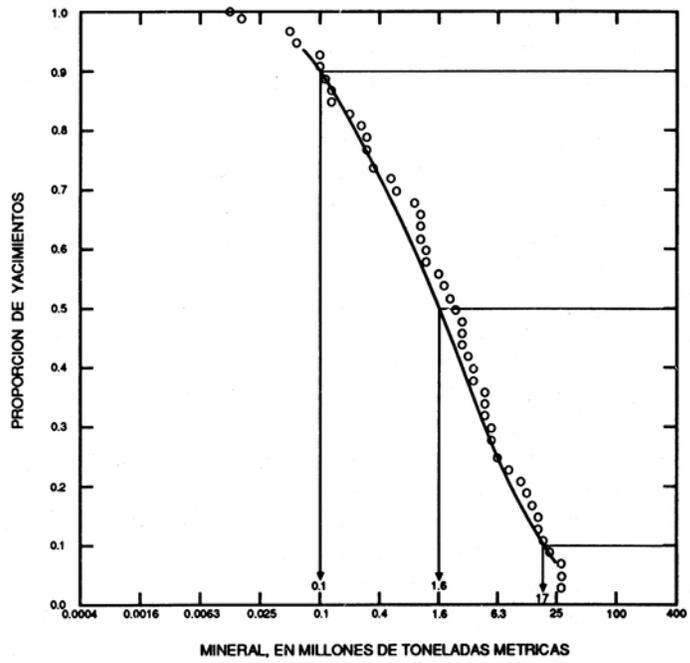
Los sulfuros masivos del tipo Chipre están compuestos por pirita masiva, calcopirita y esfalerita depositados en un ambiente marino dentro de basaltos en almohadillas o asociados a éstos. Los yacimientos se encuentran dentro de complejos ofiolíticos, asociados con diques de diabasa, basaltos en almohadillos y, en algunos casos, con brechas de basalto. Generalmente los depósitos están localizados en los basaltos en almohadillos o en las brechas basálticas encima de los diques de diabasa; raras veces se encuentran también dentro de rocas sedimentarias que sobreyacen a los basaltos (Singer, 1986). Los tonelajes y leyes de cobre de este tipo de depósito se presentan en las figuras 4G y 4H. A veces tienen concentraciones recuperables de cinc, oro y plata (Singer & Mosier, 1986), pero generalmente no contienen plomo.

En los dominios B y C se encuentran principalmente basaltos oceánicos subyacentes que forman parte de una secuencia ofiolítica originada en una cresta mediooceánica o en un ambiente cercano. Las rocas basálticas en forma de sills y diques están dentro de la Formación Salripuedes de la Península de Osa (Lew, 1983) y en los alrededores de Quepos. Algunos basaltos de la Península de Nicoya aparentemente representan montes submarinos y se excluyen de los dominios B y C. Las rocas basálticas de las penínsulas de Osa y Burica tampoco se incluyen porque contienen xenolitos de edad Plioceno lo cual indica que no han sido depositadas cerca de una cresta oceánica (Lew, 1983). Para distinguir entre los dominios B y C se utilizó un estudio geoquímico en la Península de Nicoya (Naciones Unidas, 1975b) para el cual sedimentos fluviales fueron analizados para Cu, Zn, Co y Ni. Consideramos que el dominio C es más favorable para una mineralización de sulfuros masivos del tipo Chipre, porque algunas de las muestras de sedimentos fluviales de esta área tienen concentraciones elevadas de Cu y Zn. Los datos aeromagnéticos muestran tanto para el dominio B como para el C anomalías magnéticas de alta amplitud, lo cual indica la presencia de rocas basálticas.

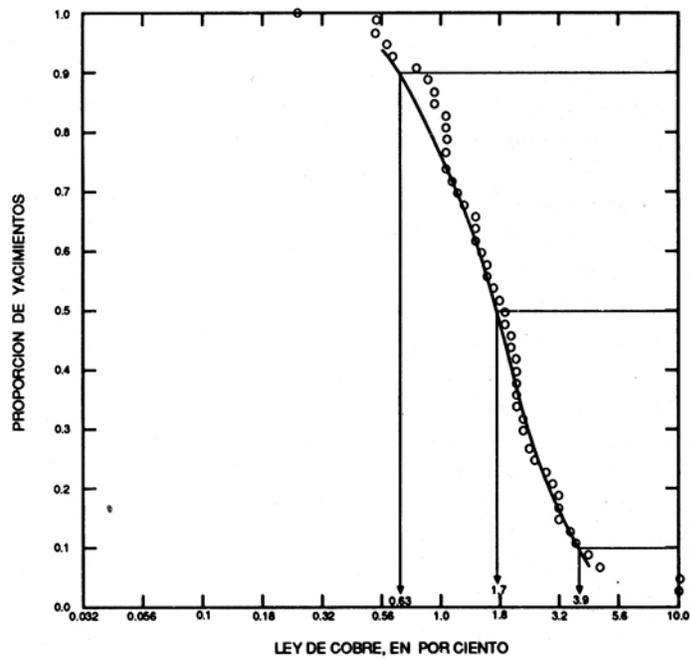
En los dominios B y C se conocen tres manifestaciones de sulfuros masivos del tipo Chipre; la mayor, con aproximadamente 180 toneladas métricas de mena de sulfuros, es todavía demasiado pequeña como para ajustarse a la curva de distribución de tonelajes de este tipo de yacimiento (Fig. 4G). Todas las mineralizaciones que se encuentran en la superficie probablemente han sido encontradas, ya que la prospección en esta región fue muy intensa. Por consiguiente, estimamos que existe una probabilidad del 90 % de que no exista ningún yacimiento no descubierto, del 50 % de que sea uno y del 10 % de que sean 2 o más.

Los yacimientos no descubiertos probablemente se encuentran en o cerca del contacto entre los basaltos en almohadillas y los sedimentos pelágicos sobreyacentes. Con un cartografiado geológico detallado se podrían identificar áreas favorables, y los afloramientos de sombrero de

CYPRUS MASSIVE SULFIDE



CYPRUS MASSIVE SULFIDE



G: Modelo de tonelaje de los depósitos de sulfuros masivos , basado en 49 yacimientos a través de todo el mundo.  
 H: Modelo de ley de los depósitos de sulfuros masivos , basado en 49 yacimientos a través de todo el mundo.

hierro o de sulfuros deben ser muestreados con cuidado. Mediante estudios geofísicos se podrían localizar posibles sitios para perforaciones.

### Yacimientos de cobre porfídico

Los depósitos de cobre porfídico se caracterizan por vetillas de cuarzo y calcopirita en forma de stockwork dentro de una intrusión porfirítica alterada hidrotermalmente y las rocas caja adyacentes (Cox, 1986b). En los sistemas de pórfidos la intrusión somera de tonalita hasta monzogranito o sienita porfirítica es contemporánea a la formación de muchos diques, chimeneas de brecha y fallas. Los yacimientos están rodeados por aureolas anchas con una alteración hidrotermal muy fuerte. Los tonelajes de los cobres porfídicos pueden ser muy altos (Fig. 4I) y las leyes de cobre varían entre 0,15 hasta aproximadamente 2 % (Fig. 4J); localmente se encuentran leyes elevadas de molibdeno y oro (Singer et al., 1986).

En Costa Rica, las regiones que son favorables para los depósitos del tipo cobre porfídico también son favorables para otros tipos de yacimientos. Los yacimientos del tipo skarn de metales básicos se forman donde abundan calizas en las rocas caja (Cox, 1986d; Cox & Theodore, 1986). Sin embargo, la distribución de las calizas en Costa Rica no está bien delimitada y por eso no se indica ningún dominio para los skarn. Los yacimientos del tipo cobre-arsénico-antimonio en rocas huéspedes volcánicas forman cuerpos masivos dentro de rocas volcánicas adyacentes a los pórfidos (Cox, 1986c). Tales yacimientos pueden presentarse en Costa Rica, pero como los controles geológicos de este tipo de yacimiento todavía no se conocen muy bien no se establecieron los dominios respectivos.

El dominio F, que es favorable para los cobres porfídicos y los yacimientos relacionados, está caracterizado por pequeños stocks que intruyen a rocas sedimentarias de aguas profundas y rocas volcánicas del Terciario en el flanco noreste del batolito de Talamanca. Aparentemente, al área que cubre el dominio F ha sido menos levantada que la parte central del batolito (Naciones Unidas, 1975b) y por eso contiene intrusiones

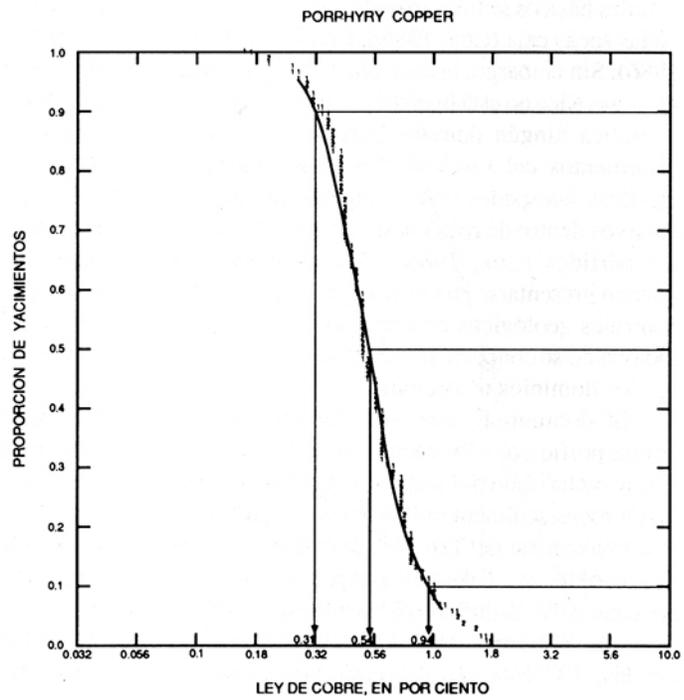
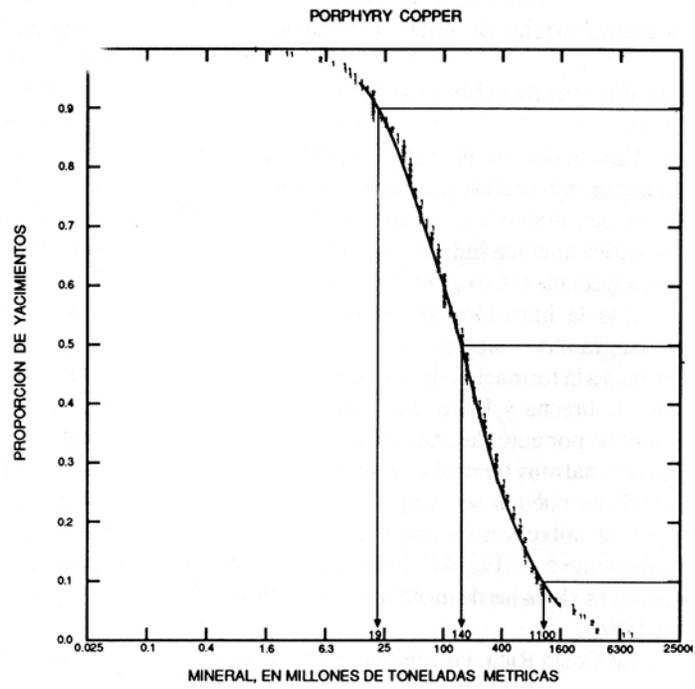
emplazadas en un nivel más alto de la corteza. Tales intrusiones someras son favorables para los yacimientos del tipo cobre porfídico. El dominio F no incluye al batolito principal al igual que al plutón con rumbo noreste, ubicado al sureste del batolito, porque el estudio de bloques dioríticos provenientes del batolito y otros encontrados en el Río del General no mostraron ni la textura ni la composición mineralógica apropiada para un pórfido. Tampoco se incluye a la Formación Suretka (Sáenz, 1982) porque las rocas son probablemente más jóvenes que las intrusiones.

Dentro del dominio F se conocen tres prospectos de cobres porfídicos en las áreas del Río Banano, Río Ñari y Sukut. Estos han sido identificados como cobres porfídicos por sus alteraciones hidrotermales características y por la presencia de calcopirita y molibdenita diseminada. Estos prospectos no han sido explorados lo suficiente como para compararlos con los modelos de tonelaje y ley (Figs. 4I, 4J) y por eso han sido incluidos en las estimaciones de los yacimientos no descubiertos.

En los mapas de los recursos minerales (Organización de los Estados Americanos, 1978) se muestran otras 20 manifestaciones minerales o anomalías geoquímicas de cobre. Estas manifestaciones fueron utilizadas para delimitar el dominio F. Debido a la asociación del plutón grande, que aflora en la cuenca del Río Ñari con el prospecto de Sukut, éste se incluyó dentro del dominio F.

Dentro del dominio F se han identificado numerosas anomalías magnéticas positivas, probablemente debido a cuerpos intrusivos y muchas anomalías negativas que pueden indicar zonas de alteración hidrotermal, donde la magnetita ha sido reemplazada por pirita u óxidos de hierro. De las 20 manifestaciones de cobre, 10 están ubicadas a menos de 2 km de las pequeñas anomalías aeromagnéticas negativas. Por lo menos 15 pequeñas anomalías aeromagnéticas negativas, posiblemente realacionadas con la alteración hidrotermal pero sin ninguna relación con manifestaciones conocidas de cobre se encuentran dentro del dominio F.

Autores anteriores (Naciones Unidas, 1975b) mencionaron que el dominio F forma la continua-



I: Modelo de tonelaje de los depósitos del tipo cobre porfídico, basado en 208 yacimientos a través de todo el mundo.

J: Modelo de ley de los depósitos del tipo cobre porfídico, basado en 208 yacimientos a través de todo el mundo.

ción hacia el noroeste de una región favorable para cobres porfídicos en Panamá. La actividad ígnea en el Terciario Tardío era la consecuencia de la subducción en la continuación sureste de la Fosa Centroamericana. El límite noroeste del dominio F coincide con una de las brechas sísmicas o límites de segmentos con rumbo noreste, que cruzan a la América Central.

El dominio F incluye una franja de 5 km alrededor de los stocks o manifestaciones de cobre exteriores, debido a la incertidumbre en la elaboración de mapas geológicos y los muestreos a nivel de reconocimiento.

Basándose en las mineralizaciones conocidas de cobre, las anomalías geoquímicas y geofísicas y el número y la densidad de yacimientos conocidos en terrenos similares de Panamá, estimamos que existe una probabilidad del 90 % de que exista un yacimiento no descubierto en Costa Rica, del 50 % de que sean tres y del 10 % de que el número de yacimientos no descubiertos sea 8 o más.

Otras mineralizaciones de cobre en Costa Rica fueron investigadas para determinar si corresponden a yacimientos del tipo de cobre porfídico. Las manifestaciones de cobre cerca de Pueblo Viejo y Cerro Boruca se excluyen del dominio F porque se trata de vetas pobres en sulfuros y ricas en hematita, que probablemente no guardan ninguna relación con cobres porfídicos. Las vetas polimetálicas ricas en cobre de Alaska y Santa Cruz del General (Naciones Unidas, 1975c) son probablemente más jóvenes y sin relación alguna con las mineralizaciones del tipo cobre porfídico. Durante el trabajo de campo se examinó la intrusión dentro de un prospecto en Siberia pero sólo se pudo confirmar la presencia de una alteración hidrotermal rica en turmalina (Naciones Unidas, 1975c). Esta intrusión no se incluyó dentro del dominio F porque no presenta ninguna otra característica típica de los cobres porfídicos.

La faja de plutones graníticos que se extiende desde el límite septentrional de la Cordillera de Talamanca hasta la intrusión de Guacimal en la Cordillera de Tilarán representa un ambiente favorable para mineralizaciones del tipo cobre porfídico, pero la escasa información no permite delimitar un dominio propio. Algunas manifes-

taciones de cobre se encontraron dentro de estas rocas plutónicas pero en la literatura no se encontró ningún trabajo que describa texturas o alteraciones hidrotermales favorables para este tipo de depósito. Además, esta región es bastante accesible y tiene una larga historia de prospección, por lo cual es poco probable que yacimientos de cobres porfídicos podrían haber escapado de la detección. Sin embargo, en la Mina La Unión (Cordillera de Tilarán) una mineralización del tipo cobre porfídico, aún con dimensiones muy reducidas, se presenta en un dique porfirítico de composición monzogranítico de 10 m de espesor que aflora en una pequeña quebrada al suroeste de la mina. Este dique contiene calcopirita y piritita diseminada y mucha bitotita secundaria.

Hasta la fecha se han realizado muchos estudios geológicos que permiten identificar varios prospectos interesantes para una exploración detallada. Las investigaciones futuras deben incluir cartografiado geológico en detalle, muestreos de rocas y suelos, métodos electromagnéticos y perforaciones.

#### **Yacimientos de bauxita laterítica**

Los yacimientos de bauxita laterítica se forman por la meteorización de rocas ricas en aluminio en peneplanicies bien drenadas y en climas húmedos y calientes. Localmente, la bauxita se forma también en áreas con mal drenaje, donde el hierro es removido en forma de complejos orgánicos (Patterson, 1986). Los tonelajes de los yacimientos de bauxita laterítica pueden ser muy grandes y este tipo de depósito representa la mena más importante para la extracción del aluminio (Mosier, 1986b).

Para la bauxita laterítica se delimitaron dos dominios: el dominio G al suroeste de San Isidro de El General y el dominio H a lo largo del Río Coto Brus. Ambos dominios están subyacentes principalmente por abanicos aluviales y terrazas de edad Plio-Pleistoceno, compuestos por sedimentos derivados de la erosión y del levantamiento de la Cordillera de Talamanca. La topografía en estos dos dominios es bastante plana y sin mucho relieve, con elevaciones entre los 800 y 1200 m; está muy disectada por los ríos y quebra-

das modernas. Debido a esta disección por el sistema de drenaje los depósitos individuales de bauxita tienen poca extensión y gran parte de la bauxita formada en los ciclos anteriores de meteorización ha sido removida por la erosión (Dondoli, 1969). La mayoría de los depósitos de bauxita en Costa Rica consisten de gravas andesíticas que se transforman en bauxita por la meteorización tropical (Alán, 1983). Los límites de los dominios G y H hacia el sur y suroeste corresponden a las cuencas de grandes ríos con sus depósitos aluviales modernos y de gran extensión, que aparentemente erosionaron los depósitos de bauxita más antiguos.

Existen algunas manifestaciones de bauxita en las llanuras al noroeste de Siquirres. El dominio I es un área con topografía plana, de tipo meseta, que coincide con las facies distales de las rocas volcánicas jóvenes. Al noroeste del dominio I no existe suficiente información geológica para delimitar otros dominios que incluyan manifestaciones conocidas de bauxita.

Los dominios G y H han sido explorados intensamente por las compañías Alcoa y Reynolds Aluminum y probablemente todas las mineralizaciones han sido encontradas. La información existente no permite una estimación del número de depósitos no descubiertos en el dominio I. Los cálculos publicados de los tonelajes en los dominios G y H varían entre 119 millones de toneladas métricas en las concesiones de Alcoa en el Valle del General (Organización de los Estados Americanos, 1978) y 590.000 toneladas en el 10 % del área mineralizada (Alán, 1983). Las leyes estimadas varían entre 26,9 %  $Al_2O_3$  con 8,2 %  $SiO_2$  y 41,1 %  $Al_2O_3$  con 11,4 %  $SiO_2$ . Estos cálculos han sido comparados con las curvas de distribución de tonelaje y ley de los yacimientos de todo el mundo (Fig. 4K, L).

Los suelos formados encima de los depósitos de bauxita generalmente presentan una vegetación enana y subnutrida porque la meteorización química disuelve muchos de los nutrientes esenciales del suelo. En otras partes del mundo la identificación de este tipo de vegetación enana fue el primer paso en la exploración de yacimientos muy grandes de bauxita. Los métodos mediante sensores remotos pueden servir para detectar a esta vegetación.

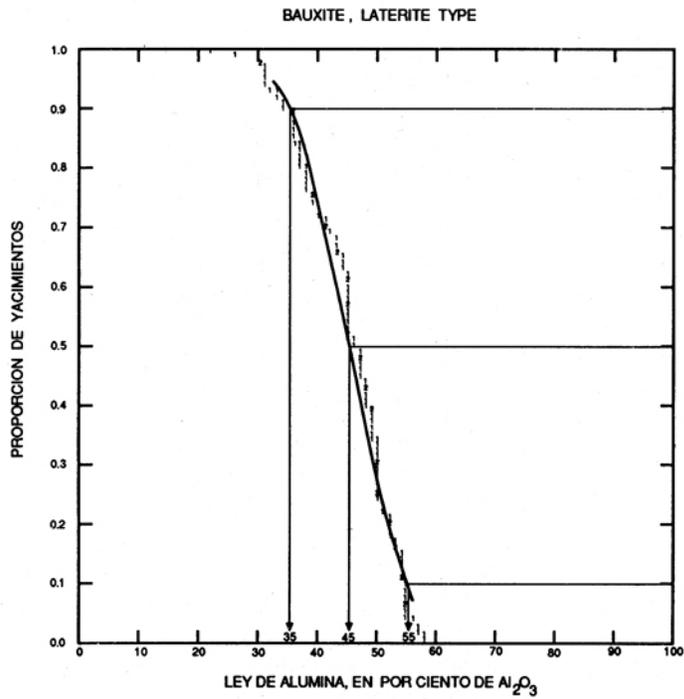
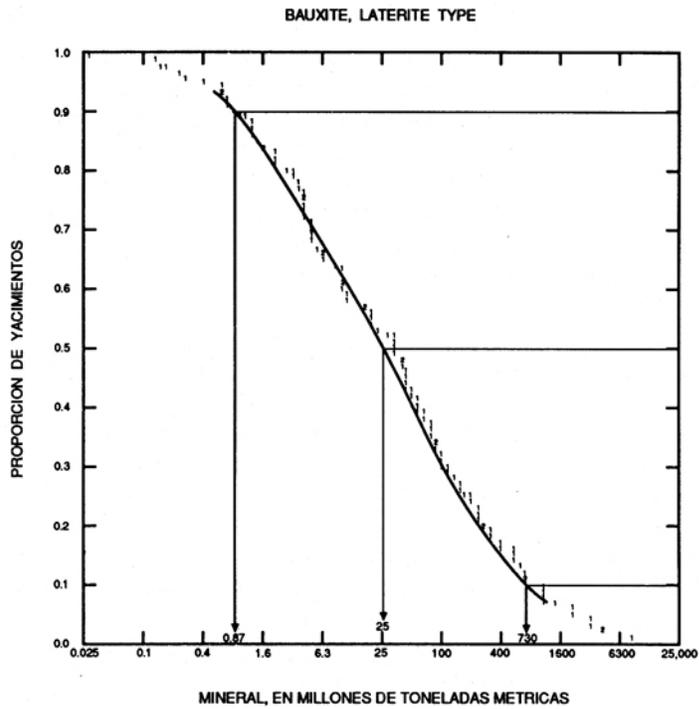
### Yacimientos de oro en placeres

Los yacimientos de oro en placeres contienen oro nativo en forma de escamas, raras veces pepitas, dentro de gravas, arenas, limos y arcillas y sus equivalentes consolidados, todos depositados en ambientes aluviales, de playa, eolianos y raramente glaciales (Yeend, 1986). Los tonelajes de los yacimientos de oro en placeres varían mucho (Fig. 4M, N, O). Pequeñas cantidades de plata y otros metales han sido extraídos de algunos yacimientos como subproductos de la explotación del oro (Orris & Bliss, 1986).

En las penínsulas de Osa y Burica los depósitos de oro de placer se presentan en varias generaciones dentro de sedimentos fluviales de edad Plioceno y más jóvenes, hasta en los aluviales recientes. Mediante un estudio de la distribución geográfica y estratigráfica del oro, de los minerales pesados asociados y el hábito y la composición del oro, Berrangé (1987) demostró que la fuente original del oro fueron las rocas subyacentes del Complejo de Nicoya. En estas rocas basálticas el oro se presenta dentro de vetas de cuarzo y secreciones asociadas a zonas de cizalle.

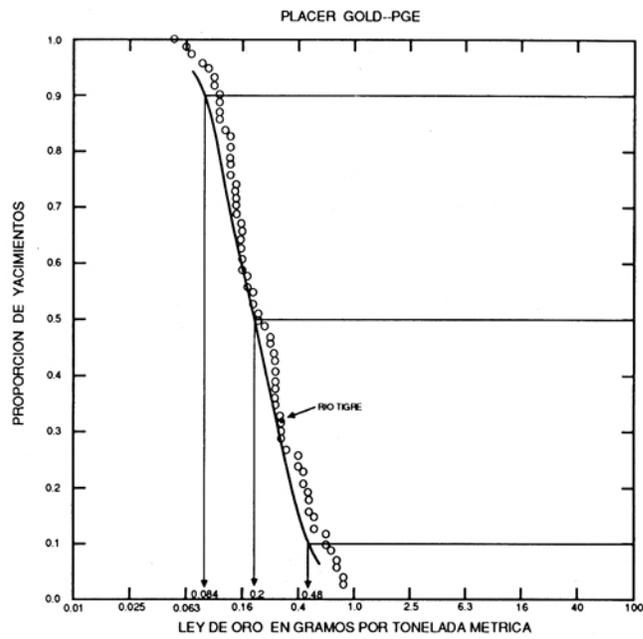
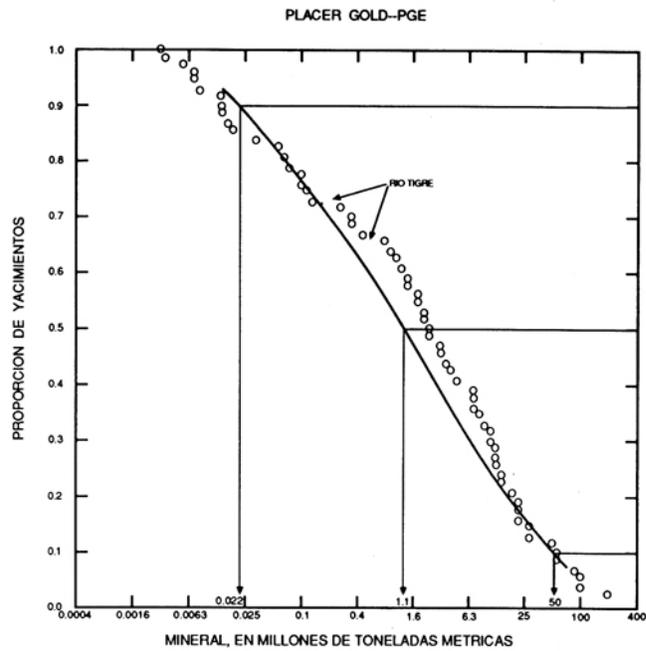
En la Península de Osa se delimitó el dominio J, incluyendo depósitos aluviales y de playa de edad reciente y placeres fósiles en las rocas sedimentarias de edad Plioceno o más jóvenes. El límite noreste del dominio J coincide con la extensión de los sedimentos aluviales que se formaron por la erosión a partir de la parte meridional de la Península de Osa. Todas las áreas que contienen secuencias que muestran esta discordancia o que son más jóvenes han sido incluidas en el dominio J. Los afloramientos de basaltos o calizas no se incluyeron porque no hay evidencias para la existencia de sedimentos de edad Plioceno o más jóvenes.

En la Península de Burica el dominio K está limitado en el norte y noreste por el Río Colorado y por los abanicos aluviales del Río Chiriqui Viejo. Las rocas que sirvieron de fuente para los placeres afloran al sur y los ríos y tributarios desaguan hacia el norte y noreste desembocando en el Río Colorado; al norte del Río Colorado no afloran rocas que podrían haber servido como fuente.

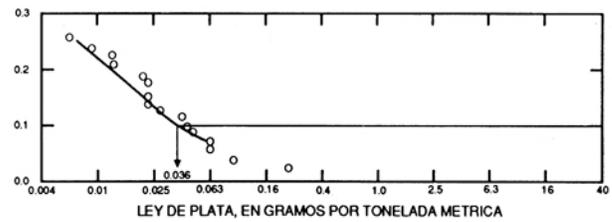


**K:** Modelo de tonelaje de los depósitos del tipo bauxita laterítica, basado en 122 yacimientos a través de todo el mundo.

**L:** Modelo de ley del aluminio de los depósitos del tipo bauxita laterítica, basado en 122 yacimientos a través de todo el mundo.



M: Modelo de tonelaje de los depósitos del tipo place-res auríferos, basado en 65 yacimientos a través de todo el mundo.  
 N: Modelo de ley de oro de los depósitos del tipo place-res auríferos, basado en 65 yacimientos a través de todo el mundo.  
 O: Modelo de ley de plata de los depósitos del tipo placeres auríferos, basado en 65 yacimientos a través de todo el mundo.



Los dominios J y K pueden extenderse mar adentro; existen evidencias que partes de la Península de Osa y áreas costeras adyacentes sufren una sumersión moderna (Lew, 1983), lo cual indica que el ambiente favorable para los placeres de oro probablemente se extiende hacia el mar. El Golfo Dulce se formó después de la depositación de la Formación Punta La Chancha, lo cual indica que el Golfo Dulce y las áreas costeras adyacentes podrían contener placeres marinos.

Más de 45 depósitos de placeres de oro fueron reportados en los dominios J y K; sin embargo, es probable que los prospectores encontraron muchos más. Partes de los dominios J y K son favorables para placeres fósiles en forma de canales dentro de la Formación Punta la Chancha y en la base de ésta. La información existente no permite estimar el número de los yacimientos no descubiertos en los dominios J y K.

#### Otros tipos de yacimientos

Los depósitos de níquel laterítico se forman por la meteorización de rocas ultramáficas y por lo tanto se podrían presentar junto a los depósitos de cromita podiforme en el dominio A. Sin embargo, en el dominio A no existen las condiciones geológicas necesarias para la formación de este tipo de yacimiento. Para el desarrollo del níquel laterítico se necesita una superficie casi plana y de gran extensión, con poca erosión y una meteorización en clima húmedo y caliente durante un lapso de tiempo muy largo. La topografía actual en la región donde afloran las rocas ultramáficas en Santa Elena sugiere que en el pasado ocurrió una erosión muy fuerte y que no existen superficies planas y elevadas de gran extensión. Las áreas bajas se formaron durante un ciclo de erosión anterior y están ahora cubiertas por rocas volcánicas jóvenes. Los estudios de campo indican que el contacto discordante entre los suelos lateríticos y los depósitos de toba más jóvenes actuó para los flujos de fluidos como un límite poroso. La sílice de los flujos tobáceos reaccionó con el suelo y forma ahora una textura celular ("boxwork") síliceo.

Los depósitos de vetas polimetálicas están compuestas por filones de cuarzo y carbonatos

con plata y oro, asociados a los sulfuros de metales básicos que a su vez están relacionados con intrusiones hipoabisales dentro de rocas sedimentarias y metamórficas (Cox, 1986a). Estos depósitos son generalmente pequeños, pero localmente presentan una ley bastante alta. Depósitos del tipo de vetas polimetálicas se encuentran en Costa Rica relacionados con algunas intrusiones, como por ejemplo, las vetas de galena y esfalerita cerca de Guacimal y las al suroeste de San José (Mina Limón) y las vetas cupríferas en Alaska y Santa Cruz del General.

El oro (Berger, 1986), mercurio (Rytuba, 1986) y azufre pueden formarse en sistemas de fuentes termales. Depósitos del tipo fuente termal se presentan a veces en los centros volcánicos subaéreos de composición andesítica hasta riolítica o en sus alrededores. Los ambientes volcánicos más comunes son calderas, estratovolcanes andesíticos y domos riolíticos con sus coladas relacionadas. En los sistemas termales donde predomina el agua se forma preferiblemente oro, mientras que en los sistemas dominados por vapor el azufre es más frecuente; el mercurio se forma en ambos sistemas termales. Hace poco se reconoció que algunos de los depósitos de metales preciosos en Costa Rica pertenecen al tipo de fuentes termales, por ejemplo, los prospectos de Beta Vargas y Cañamazo. El yacimiento de Santa Clara, una mina que fue explotada durante años, probablemente también es de origen de fuente termal. Todos estos depósitos se formaron en o muy cerca de la superficie en un ambiente de una fuente termal activa. En el presente trabajo no delimitamos formalmente un dominio para este tipo de depósito; correspondería aproximadamente con los afloramientos de las rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias, incluyendo a la Formación Monteverde y los volcanes activos y abarcaría también mucho de los dominios D y E que fueron determinados para los depósitos epitermales del tipo Sado. No incluimos en el dominio de las fuentes termales a todas las áreas volcánicas profundamente erosionadas, como por ejemplo, el área cerca de la intrusión de Guacimal. No se hizo ninguna estimación del número de yacimientos del tipo de fuente termal no identificado porque carecemos de información geológica detallada.

Prospectos de azufre del tipo fuente termal se conocen tanto de la Cordillera Central como de la Cordillera de Guanacaste. La exploración de los depósitos de oro y mercurio del tipo fuente termal debe de concentrarse en las áreas donde aflora sinter, sin importar la presencia o no de aureolas con alteración hidrotermal del tipo arcilloso en las rocas caja. Las zonas con una fuerte silicificación masiva y con brechas hidrotermales de diferentes generaciones son otros indicadores importantes. La exploración de azufre del tipo de fuente termal debe de realizarse en las zonas que presentan una lixiviación ácida y donde se presentan sulfatos, especialmente alunita. Las rocas caja que sufrieron una alteración hidrotermal debido al sistema geotérmico se caracterizan por concentraciones anómalas de oro, plata, mercurio, arsénico, talio y antimonio.

Las manifestaciones de sulfuros y de cobre nativo disseminado o en forma de amigdalas en coladas subaéreas basálticas en Costa Rica no se pueden correlacionar con ningún tipo de depósito. Generalmente estas mineralizaciones contienen solamente bajos contenidos de cobre.

Los depósitos de cobre hematítico consisten de brechas y fracturas con rellenos de hematita, acompañada por bornita y localmente por calcosina o calcopirita. Rellenos de vetas con cuarzo o calcita son raros. La alteración de la roca caja a clorita es muy intensa. Vetas de este tipo se presentan frecuentemente en algunos lugares del Perú y al suroeste de los Estados Unidos, pero hasta ahora no se encontró ninguna mineralización que valga la pena explotar. Varias manifestaciones de este tipo, como por ejemplo las del Cerro Boruca y de Pueblo Nuevo, se conocen en los alrededores de División, cerca de San Isidro del General. Sin embargo, no existen suficientes datos geológicos como para delimitar un dominio para este tipo de mineralización en Costa Rica.

Áreas con rocas volcánicas y subvolcánicas de composición alcalina en Costa Rica son favorables para mineralizaciones de oro. Estas rocas afloran en la cuenca del Río San Carlos, cerca de Tortugero y en el Río Reventazón, entre Siquirres y Turrialba (Azema & Tournon, 1977; Robin & Tournon, 1978). Los depósitos de oro que podrían encontrarse en esta área son de dos tipos:

oro disseminado del tipo Lihir Island y del tipo telururos de oro y plata. El oro disseminado del tipo Lihir Island (Nueva Guinea) ha sido encontrado hace pocos años en rocas volcánicas alcalinas de un cráter Cuaternario y está asociado con una alteración hidrotermal alunítica muy intensa y de gran extensión (Williamson, 1983). Hacia la profundidad, la alteración alunítica pasa a una alteración potásica de las rocas intrusivas sieníticas que ocupan el conducto del volcán. Estos depósitos no solamente están caracterizados por altos valores anómalos de oro y plata, sino también de arsénico y contenidos elevados de cobre, plomo, cinc y molibdeno. El yacimiento de Lihir Island contiene por lo menos 137 millones de toneladas de mena con una ley de 2,66 g Au por tonelada. Tanto en Lihir Island como en el noreste de Costa Rica, las rocas volcánicas alcalinas se encuentran a una distancia de aproximadamente 200 km de una fosa activa y detrás de una cadena compuesta por volcanes activos de carácter calcoalcalino.

Otro tipo de depósito que se presenta a veces en rocas volcánicas alcalinas son vetas con telururos de oro y plata. Este tipo de depósito fue encontrado en Vatukoula (Fiji) donde un basalto alcalino alterado contiene vetas de calcita, cuarzo, calaverita o silvanita (Colley, 1976). La mayoría de las vetas se encuentran cerca del borde de una caldera rellena con brechas. Este tipo de depósito requiere de una prospección detallada y muy intensiva porque las vetas tienen muy poco espesor y la alteración hidrotermal de la roca caja es bastante débil. Además, los telururos se meteorizan fácilmente y forman oro muy fino que generalmente no aparece en placeres. A pesar de que no se conoce ninguna manifestación de este tipo en Costa Rica, la exploración debe de concentrarse en los centros volcánicos.

## CONCLUSION

La extracción del oro en Costa Rica ha sido principalmente de las vetas epitermales del tipo Sado y de los placeres de oro. Estimamos que hay una probabilidad del 90 % de encontrar en los dominios D y E 4 depósitos del tipo Sado no descubiertos hasta ahora y del 10 % de 17 ya-

cimientos o más. A pesar de que los dominios J y K, que fueron delimitados para el oro de placer, han sido explorados con bastante detalle, creemos que todavía se podrían encontrar nuevos placeres fósiles. En Costa Rica no se conoce ningún yacimiento seguro del tipo fuente termal, pero se presentan condiciones geológicas muy favorables para este tipo de depósito. Además, existe la posibilidad de encontrar en la parte noreste de Costa Rica depósitos de oro asociados con rocas volcánicas y subvolcánicas de composición alcalina.

Los depósitos de cobres porfídicos tienen mundialmente una reserva promedia de  $140 \cdot 10^6$  toneladas y una ley promedia de 0,54 % de Cu. Se estima que en el dominio F hay una probabilidad del 90 % de encontrar un yacimiento, del 50 % para 3 y del 10 % para 8 o más cobres porfídicos no descubiertos.

En los dominios B y C, en la Península de Nicoya, se conocen más de 90 manifestaciones de manganeso volcanogénico. A pesar de que el tamaño promedio de este tipo de depósito mundialmente es de solo 47.000 toneladas, ninguna de las manifestaciones de Costa Rica alcanza este valor. Se supone que mineralizaciones con un tamaño parecido a las manifestaciones conocidas en superficie deben estar presentes a mayor profundidad.

El dominio A en la Península de Santa Elena delimita una área con depósitos de cromita podiforme. Este tipo de yacimiento tiene reservas promedias de 130 toneladas. Se estima que en el dominio A hay una probabilidad del 50 % de que se presenten 13 mineralizaciones de cromita podiforme, no encontrados hasta la fecha y del 10 % que sean 63 o más.

Los depósitos de sulfuros masivos del tipo Chipre contienen cobre, cinc y localmente también oro y plata. Los modelos establecidos para este tipo de yacimiento muestran que su tamaño promedio es de 1,3 millones toneladas. Para Costa Rica se estima que en los dominios B y C existe una probabilidad del 50 % de que haya un yacimiento no descubierto todavía y del 10 % de que sean 2 o más.

De los tres dominios con depósitos del tipo bauxita laterítica (G,H,I) solamente el dominio I

ubicado en las llanuras al noreste de Siquirres tiene buenas perspectivas para encontrar yacimientos no descubiertos.

Otros tipos de depósitos que se encuentran en Costa Rica, pero para los cuales no se delimitaron los dominios respectivos, son los placeres de magnetita en las playas, vetas polimetálicas, skarn de cobre, skarn de plomo-cinc y azufre del tipo fuente termal. A pesar de que se estudiaron los depósitos del tipo níquel laterítico, no existe mucha probabilidad de encontrar un yacimiento de este tipo.

## BIBLIOGRAFIA

- Alán M., M.A., 1983: Geología y estudio de lateritas en el extremo noroeste del Valle de El General. - 77 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (tesis inédita).
- Albers, J.P., 1986: Descriptive model of podiform chromite. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 34.
- Attanasi, E.D. & DeYoung, J.H., Jr., 1986: Grade and tonnage model of shoreline placer Ti. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 270-273.
- Azambre, B., & Tournon, J., 1977: Les intrusiones basique alcalines du Río Reventazón (Costa Rica). - *Compt. R. Sommaire Bull. Soc. Géol France*, 19: 104-107.
- Berger, B.R., 1986: Descriptive model of hot spring Au-Ag. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 143-144.
- Berrangé, J.P., 1987: Gold in Costa Rica. - *Mining Mag.*, May 1987: 402-407.
- Colley, H., 1976: Mineral deposits of Fiji (Metalic deposits). - 123 págs., Fiji Ministry Lands & Mineral Resources., Mineral Res. Div. Mem., 1
- Cox, D.P., 1986a: Descriptive model of polymetallic veins. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 125.
- \_\_\_\_\_, 1986b: Descriptive model of porphyry Cu. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 76.
- \_\_\_\_\_, 1986c: Descriptive model of volcanic-hosted Cu-As-Sb. - *En*: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.):

- Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 123.
- \_\_\_\_\_, 1986d: Descriptive model of Zn-Pb skarn deposits. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 90.
- Cox, D.P. & Singer, D.A., 1986: Mineral deposit models. - 379 págs., U.S. Geological Survey Bull. 1693.
- Cox, D.P. & Theodore, T.G., 1986: Descriptive model of Cu skarn deposits. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 86.
- Dondoli, S., 1970: Localización de un horizonte laterítico bauxítico en la zona de Paraiso de Cartago, Costa Rica. - 12 págs., Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Inf. Téc. y Notas Geól., 9, 36.
- Force, E.R., 1986: Descriptive model of shoreline placer Ti. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 270.
- Hesselbom, A., 1985: Geophysical methods in the exploration for gold-bearing quartz veins in Nicaragua [abs.]. - Geoexploration, 23, 3: 416-417.
- Koski, R.A., 1986: Descriptive model of volcanogenic Mn. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 139.
- Lew, L., 1983: The geology of the Osa Peninsula, Costa Rica. Observations and speculations on the outer arc of the southern Central American orogen. - 79 págs., College Station, Pennsylvania State University (tesis inédita).
- Middleton, R.S. & Campbell, E.E., 1979: Geophysical and geochemical methods for mapping gold-bearing structures in Nicaragua. - En: Hood, P.J. (ed.): Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores: 779-798; Geol. Surv. Canada Economic Geol. Rep., 31.
- Mosier, D.L., 1986a: Grade and tonnage model of volcanogenic Mn. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 139-141.
- \_\_\_\_\_, 1986b: Grade and tonnage model of laterite type bauxite deposits. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 255-257.
- Mosier, D.L., Berger, B.R. & Singer, D.A., 1986: Descriptive model of Sado epithermal veins. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 154.
- Mosier, D.L. & Sato, T., 1986: Grade and tonnage model of Sado epithermal veins. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 155-157.
- Naciones Unidas, 1975a: Proyecto de investigación minera, Costa Rica, Nicoya y Santa Elena. - 75 págs., Naciones Unidas, Inf.Téc., 1 (DP/UN/COS-72-004/1).
- \_\_\_\_\_, 1975c: Proyecto de investigación minera, Costa Rica. - Naciones Unidas, Inf.Téc., 2 (DP/UN/COS-72-004/2).
- \_\_\_\_\_, 1975c: Proyecto de investigación minera, Costa Rica, Trabajos varios. - 83 págs., Naciones Unidas, Inf.Téc., 3 (DP/UN/COS-72-004/3).
- Organización de los Estados Americanos, 1978: Diagnóstico del sector minero. - 91 págs., Organización de los Estados Americanos, San José.
- Orris, G.J. & Bliss, J.D., 1986: Grade and tonnage model of placer Au-PGE. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 261-264.
- Richter, D.H., Singer, D.A. & Cox, D.P., 1975: Mineral resources map of the Nabesna quadrangle, Alaska. - U.S. Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF-655-K, scale 1:250,000.
- Robin, C. & Tournon, J., 1978: Spatial relations of andesitic and alkaline provinces in Mexico and Central America. - Canadian J. Earth Sci., 15: 1633-1641.
- Rytuba, J.J., 1986: Descriptive model of hot-spring Hg. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 178.
- Sáenz, R. (coord.), 1982: Mapa geológico de Costa Rica, escala 1:200.000. - Dirección de Geología, Minas y Petróleo, San José; 9 hojas.
- Singer, D.A., 1975: Mineral resource models and the Alaskan Mineral Resource Assessment Program. - En: Vogely, W.A. (ed.): Mineral material modeling- A state-of-the-art review: 370-382; John Hopkins University Press, Baltimore, Md.
- \_\_\_\_\_, 1986: Descriptive model of Cyprus massive sulfide. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 131.
- Singer, D.A. & Mosier, D.L., 1986: Grade and tonnage model of Cyprus massive sulfide. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 131-135.
- Singer, D.A., Mosier, D.L. & Cox, D.P., 1986: Grade and tonnage model of porphyry copper. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit

- models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 77-81.
- Singer, D.A. & Page, N.J., 1986: Grade and tonnage model of minor podiform chormite. - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 34-37.
- United States Geological Survey, 1986: Mineral Resource Assessment of the Republic of Costa Rica. - 75 págs., U.S. Geol. Surv. Misc. Investigations Map I-1865.
- Williamson, A., 1983: Thermal activity on Lihir Island, New Ireland Province (Papua New Guinea). - 32 págs., Geol. Surv. Papua New Guinea Rep. 83-15.
- Yeend, W.E., 1986: Descriptive model of placer Au-PGE. - - En: Cox, D.P. & Singer, D.A. (eds.): Mineral deposit models; U.S. Geological Survey Bull. 1693: 261.