

ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE DE TENDENCIA PARA COBRE EN SEDIMENTOS FLUVIALES DE LA REGIÓN CORDILLERANA DE ÑUBLE

GUILLERMO ALFARO H.

Inst. Invest. Geol., Casilla 10465, Santiago, Chile.

RESUMEN

Se hace un estudio de la distribución de cobre en sedimentos fluviales de 327 muestras obtenidas en un área de aproximadamente 640 km², en la región cordillerana situada al este de la ciudad de Chillán (Ñuble). El análisis se efectuó aplicando el desarrollo estadístico conocido como "análisis de la superficie de tendencia" (trend surface analysis). Se hace una fundamentación matemática simple de esta técnica, se explica su utilización mediante un ejemplo de exploración geoquímica y se analizan, brevemente, sus limitaciones. Mediante un programa de computación se calcularon las superficies de tendencia de grado 1, 2 y 3; se obtuvieron los valores residuales, el mejor ajuste de la superficie y el coeficiente de correlación. En base al coeficiente de correlación obtenido para cada superficie, se observa que la mayor simplificación relativa del problema se logra al pasar de la superficie de grado 1 a la superficie de grado 2 (coeficiente de correlación varía de 0,26 a 0,43 respectivamente). Aun cuando el ajuste calculado es malo, la dispersión de los valores originales de cobre disminuye, obteniéndose tres anomalías de valores residuales positivos de las cuales una es llamativa, interpretándose ésta como relacionada con la mineralización de cobre del río San José.

ABSTRACT

A study of the copper distribution of 327 stream-sediment samples collected in an area of about 640 km², of the Andes, east of Chillán (province of Ñuble, Chile) is presented here. Trend surface analysis is used in the evaluation of data. A simple mathematical fundamentation of this technique is presented and explained by a geochemical exploration example; its limitations are briefly analyzed.

By means of a computer programme the trend surfaces of grade 1, 2 and 3, the residual values, the best fit and the correlation coefficients were calculated. The correlation coefficients obtained for each surface show that the biggest relative simplification of the problem is obtained changing from grade 1 surface to grade 2 surface (the correlation coefficients change from 0.26 to 0.43, respectively). Even though the fitness is poor, the dispersion of original values of copper is diminished. Three anomalies of positive residual values were obtained; one of them being important and related with the copper mineralization at San José river.

INTRODUCCION

OBJETIVO DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene por finalidad estudiar la distribución de cobre contenido en los sedimentos fluviales de los ríos, que drenan una porción de la franja cordillerana situada al este de la ciudad de Chillán (Provincia de Ñuble), mediante la aplica-

ción de la técnica de "análisis de la superficie de tendencia" (trend surface analysis).

Los datos geoquímicos del área fueron interpretados, anteriormente, aplicando otros criterios estadísticos, tales como análisis de los componentes principales y representación de los valores anómalos ($\bar{X} + 3S$ de la población tamizada) de los

elementos estudiados, incluido cobre, (IIG-MMAJ, 1978; Alfaro, 1980). La utilización de los componentes principales permitió delimitar zonas relativamente grandes, en que predominan uno y otro de los componentes (uno de los cuales corresponde a cobre). La representación de los valores anómalos de cobre en el plano (Fig. 3), muestra una alta dispersión, aunque conforman una anomalía en la zona del río San José.

Finalmente, se desea usar este trabajo para describir el desarrollo estadístico del análisis de la superficie de tendencia, cuya utilidad es notoria cuando se dispone de información geoquímica regional con poca densidad de datos.

UBICACION

El área se extiende entre las localidades de Coihueco (límite norte) y Recinto (límite sur). La superficie total alcanza aproximadamente a 640 km² y está delimitada por las coordenadas 36°36' y 36°51' latitud sur y 71°30' y 71°45' longitud oeste (Fig. 1).

METODO DE TRABAJO

Las muestras (327 en total) fueron obtenidas durante la exploración geoquímica regional mediante sedimentos fluviales, que efectuó el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), conjuntamente, con la Metal Mining Agency of Japan (MMAJ) el año 1979. Las muestras fueron analizadas por Cu, Zn, Ag, Mo, As y, parcialmente, por Au. Las determinaciones se hicieron por espectrometría de absorción atómica a excepción del Mo, que fue analizado por colorimetría.

Con el objeto de lograr una distribución regular de los puntos de muestreo y eliminar las zonas de alta concentración, las muestras se llevaron a una cuadrícula arbitraria, sobreimpuesta a la región estudiada, con una celda unitaria regular; en el centro de dicha celda se colocó el valor medio de todos los puntos incluidos en ella. Finalmente, a cada muestra estimada correspondió una coordenada arbitraria, relacionada con las coordenadas geográficas.

El análisis de la superficie de tendencia se hizo mediante un computador FACOM 230, en la Facultad de Ciencias, Universidad de Tohoku, Japón. El programa, que utiliza lenguaje FORTRAN 4,

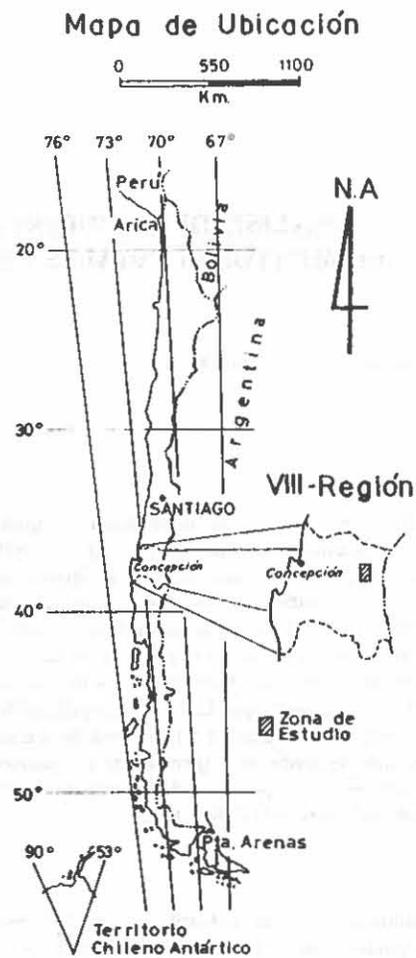
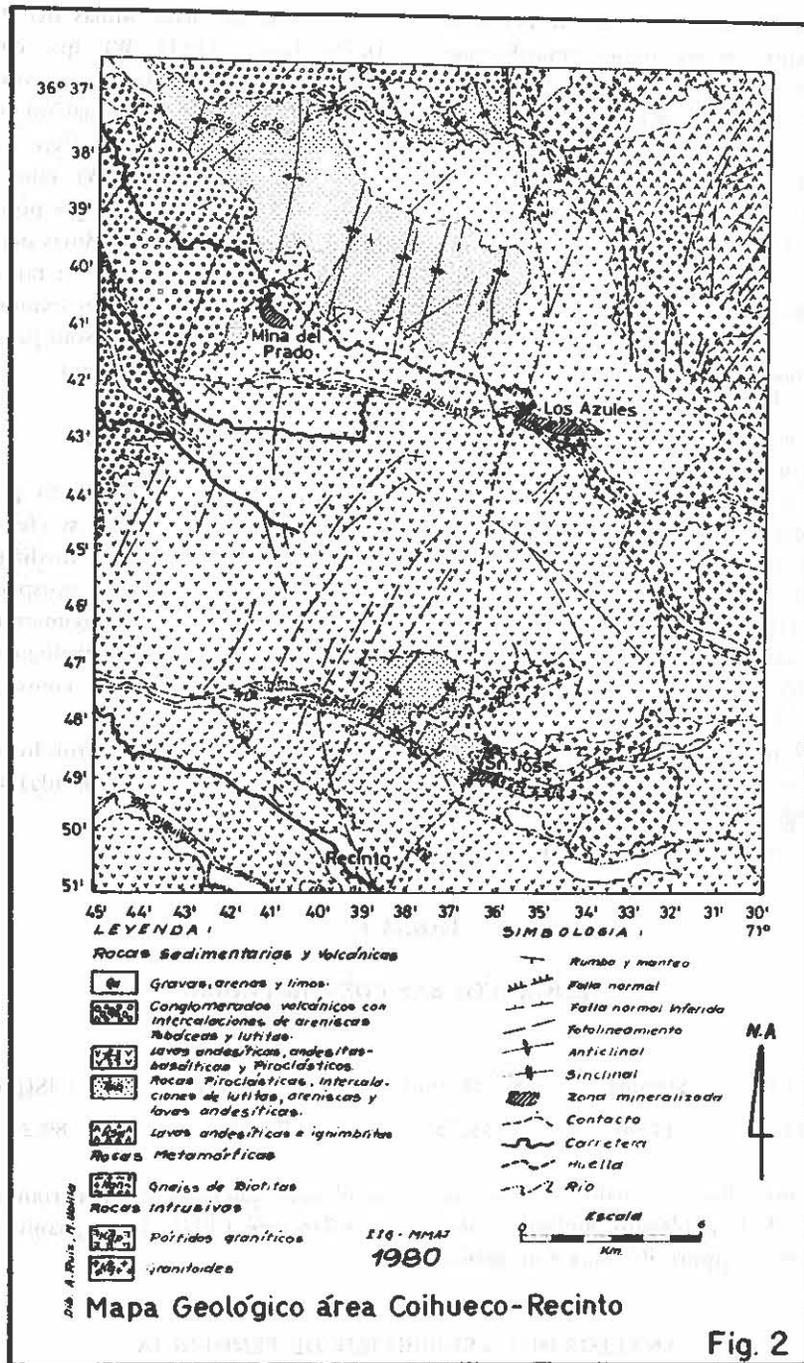


FIG. 1. Mapa de Ubicación.

calcula los coeficientes de la ecuación de la superficie elegida, da un listado de los valores estimados y residuales, entrega el coeficiente de correlación entre las variables y calcula la calidad del ajuste de la superficie; finalmente, mediante un impresor lineal, entrega un mapa de la superficie, de acuerdo a los valores de referencia elegidos. Con los valores residuales entregados por el programa de computación, se dibujaron planos correspondientes a las superficies de grado 1, 2 y 3.



GEOLOGIA Y PROSPECCION GEOQUIMICA DEL AREA ESTUDIADA

GEOLOGIA GENERAL

En la región estudiada se han reconocido rocas sedimentarias, volcánicas, metamórficas e intrusivas

(IIG-MMAJ, 1978; Alfaro, 1980; Fig. 2).

Alrededor del 75% del área está cubierta por lavas andesítico-basálticas y rocas piroclásticas, con estructura monoclinal y suave buzamiento al

oeste; estas rocas han sido asignadas al Terciario superior-Cuaternario y se las conoce como Formación Cola de Zorro (González y Vergara, 1960).

En la parte central-norte y central-sur, afloran rocas piroclásticas con intercalaciones de lutitas, areniscas y lavas andesíticas, bien estratificadas y afectadas por un conjunto de sinclinales y anticlinales, cuyos ejes tienen rumbo norte-sur. Esta secuencia ha sido denominada Unidad Volcánico-Sedimentaria Piernas Blancas y se asigna, en base a su contenido faunístico, al Eoceno.

En el extremo noreste del área estudiada, aflora una secuencia de lavas andesíticas e ignimbritas cuya edad radiométrica corresponde al Cretácico Superior y se correlacionaría con la Formación Abanico (González y Vergara, 1960).

Las únicas rocas metamórficas observadas afloran en el curso medio del río Niblinto, en la localidad de Los Azules: litológicamente, es un gneis de biotita de edad indeterminada.

Las rocas intrusivas mapeadas corresponden a granitoides, pórfidos graníticos y diques granodioríticos. La edad del granitoide, en base a dataciones K-Ar es 69 m.a. (Cretácico Superior), a él se asocia la mineralización de cobre y molibdeno que se conoce en la región.

Existen dos zonas principales con mineraliza-

ción: la denominada Minas del Prado (Lat. 36° 38' S; Long. 71°41' W), que consiste en una brecha volcánica silicificada, con oro y pirita, cuya erosión ha permitido la formación de placeres auríferos, y el prospecto cuprífero San José (Lat. 36°48' S; Long. 71°37' W) con mineralización y alteración hidrotermal tipo pórfido cuprífero (IIG-MMAJ, 1979). Sólo Minas del Prado ha sido explotado, artesanalmente, en tanto que el prospecto San José está siendo explorado. En otras partes del área se conocen sólo pequeñas manifestaciones de cobre y molibdeno.

PROSPECCION GEOQUIMICA

Paralelamente al levantamiento geológico hecho por la comisión IIG-MMAJ, se efectuó la prospección geoquímica regional, mediante sedimentos fluviales. El objeto de esta prospección fue complementar la búsqueda de yacimientos que se hacía a través del levantamiento geológico del área, principalmente de depósitos de cobre y/o molibdeno diseminados.

Para el cobre se obtuvieron los siguientes estadígrafos (población no-tamizada) señalados en la Tabla 1:

TABLA 1

ESTADIGRAFOS BASICOS PARA COBRE

\bar{X} (ppm)	S(ppm)	$\bar{X} + S$ (ppm)	$\bar{X} + 2S$ (ppm)	$\bar{X} + 3S$ (ppm)
38,25	17,00	55,25	72,25	89,25

Se definió como valores anómalos aquéllos superiores a $\bar{X} + 3S$ de la población tamizada (valores mayores que 89,25 ppm); llevados a un plano,

se observa que ellos se concentran en el área de los ríos San José, Chillán y San Juanito (Fig. 3).

ANALISIS DE LA SUPERFICIE DE TENDENCIA

FUNDAMENTO, APLICACION Y LIMITACIONES

El análisis de la superficie de tendencia es una técnica estadística, aplicada a una variable, que consiste en ajustar una superficie matemática a un conjunto de datos (por ejemplo, contenido de un

elemento en traza en una región). El procedimiento de ajuste se hace, generalmente, mediante el método de los mínimos cuadrados.

El análisis de la superficie de tendencia se relaciona con coordenadas geográficas, de modo que los resultados indican tendencias de una variable

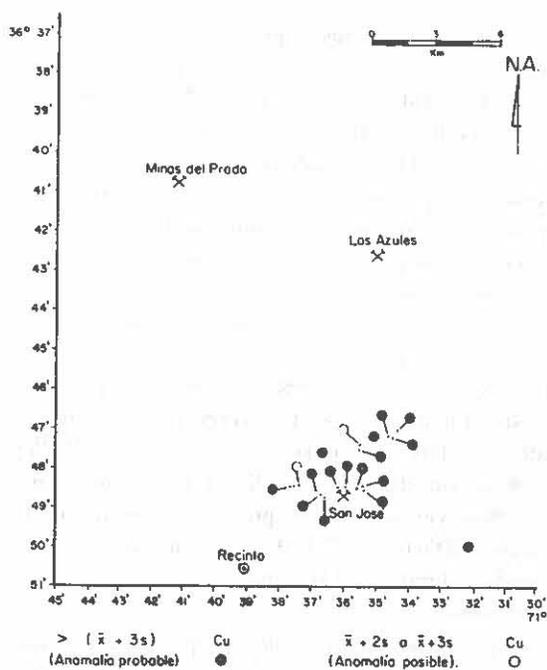


Fig. 3: Mapa de valores anómalos de Cu.

en un plano. Dejando de lado las complejidades del desarrollo matemático, tales como la inclusión de una tercera coordenada, es posible comparar el análisis de la superficie de tendencia con el análisis de regresión. Así, para calcular la regresión de una variable Y en la variable X se resuelve la ecuación $Y = b_0 + b_1 X$, encontrando los coeficientes b_0 y b_1 . Si la ecuación anterior considera dos variables independientes X_1 y X_2 se obtendrá la ecuación de la superficie de tendencia del tipo:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$$

en que la simbología corresponde a:

Y = observación geológica (por ejemplo, contenido de cobre en sedimentos).

b_0 = constante relacionada con la medida de las observaciones.

b_1 = componente geográfica este-oeste.

b_2 = componente geográfica norte-sur.

Así como se genera una curva de orden 2 (por ejemplo, una parábola) a partir de la ecuación lineal, es decir, agregando un término al cuadrado,

tal como $Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2$, en el caso de una superficie de tendencia de grado 2, la expansión es similar:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_1 X_2$$

grado 1

grado 2

En forma semejante, pueden obtenerse superficies de más alto grado, complicando la resolución del problema (Davis, 1973).

Los valores Y' obtenidos al resolver las ecuaciones, corresponden a valores estimados de la observación original Y , y son puntos de la superficie. La diferencia entre Y e Y' representa el *residual* de cada observación que, para los efectos prácticos, pueden estimarse como la información remanente al eliminar el "ruido". Con esto se logra contrastar los valores originales, cuando existe poca diferencia entre ellos o baja densidad de muestreo.

Un ejemplo teórico para demostrar la utilidad del análisis de la superficie de tendencia, expresado en dos dimensiones, se señala en la Fig. 4, a, b y c. La Fig. 4a representa un perfil de una capa de caliza mineralizada (por ejemplo, con Ag) y plegada, los valores comerciales de mineral se encuentran estrechamente vinculados a las crestas y senos de los pliegues. El techo del manto ha sido reconocido mediante 5 sondajes (DDH-1 a DDH-5), de modo que los puntos de intersección con la capa mineralizada pueden expresarse como función de la profundidad (coordenadas norte-sur) y de un origen arbitrario (coordenadas este-oeste). Se desea lograr, mediante el análisis de la superficie de tendencia, el lugar óptimo para planificar los próximos sondajes.

La Fig. 4a corresponde al ajuste de una recta; los residuales logrados al ajustar una función de grado 1 son amplios, aun cuando reducen la zona a perforar.

Las Figs. 4b y 4c corresponden al ajuste de curvas de grado 2 y 3, respectivamente, lográndose disminuir los residuales y aproximándolos a un blanco ideal (desde el punto de vista estadístico) para perforar.

Algunas preguntas nacen al iniciar el análisis: ¿cómo decidir si una superficie de orden superior es útil?; ¿mejora la interpretación al hacer un ajuste con una superficie de grado 4? En la litera-

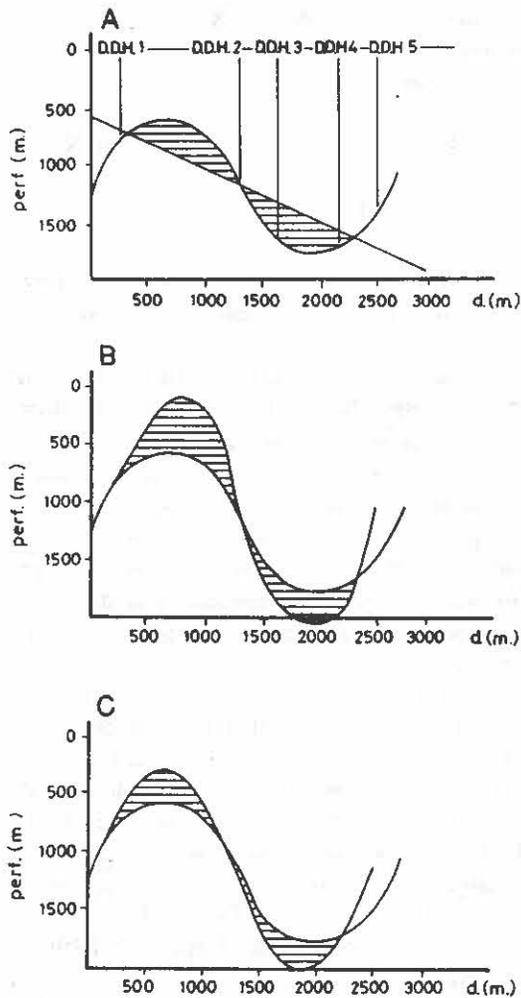


FIG. 4. Ajuste de la superficie de tendencia de grado 1, 2 y 3 a datos de una perforación con broca de diamante (achurado representa los valores residuales).

tura aparecen algunos criterios estadísticos para responder esas preguntas, basados en la comparación de la media al cuadrado, de todos los términos de grado superior, con dispersión residual o comparando la calidad del ajuste de la superficie, de modo que la dispersión residual sea mínima (Chayes, 1970). En forma pragmática, se sugiere seguir a aquellos autores que consideran que el objetivo fundamental de este desarrollo estadístico es obtener una simplificación de los datos. En el estudio de fenómenos geológicos, esto se logra, generalmente, considerando superficies de grado 2 ó 3 o, a lo sumo, 4 (Allen y Krumbein, 1962).

La calidad del ajuste que se ha mencionado anteriormente determina si los componentes de la función elegida (grado 1, grado 2, etc.) son estadísticamente significativos. Un índice de esta variación se obtiene midiendo la desviación de la variable dependiente (cobre en el presente ejemplo) de su valor medio, y comparándolo con la desviación debida a la superficie ajustada; el valor se expresa en porcentaje.

El significado exacto de la calidad del ajuste ha sido materia de discusión, sólo hay acuerdo en que valores menores que 30% se consideran como mal ajuste. En tales casos, la interpretación de los resultados debe ser cuidadoso. Ajustes entre 40% y 60% se consideran "normales" y ajustes superiores a 70% se ven como muy próximos a los datos originales (Davis, 1973). En este último caso, el aporte del método a la simplificación del problema es mínimo.

Las limitaciones del método provienen, fundamentalmente, del espaciamiento del muestreo. Idealmente, los puntos deben estar geográficamente bien repartidos, lo cual no implica que estén regularmente espaciados. El efecto de mala distribución de los puntos es notorio en los márgenes de los mapas donde existe un quiebre entre la información obtenida en terreno y que pertenece al área mapeada y aquella que va más allá de los límites del mapa y que no es considerada; por lo tanto, la superficie obtenida no tiene la forma correcta en los bordes del mapa. Para obviar esta situación es conveniente considerar un área mayor a la de interés e, igualmente, obtener algunos puntos de control en aquellas zonas sin información; esto es frecuente en exploración geoquímica regional donde, a veces, por dificultad en el acceso, falta de tiempo, etc., se dejan sistemas de drenaje sin muestrear.

Otra posible fuente de error en el análisis de la superficie de tendencia se refiere a la distribución de los puntos de muestreo en relación a la geología. En este caso, se genera una deformación de los residuales cuando los puntos están dispuestos, regularmente, (por ejemplo, cuadrícula de muestreo en suelo o roca); esta situación puede producirse cuando existe una repetición regular de la variable muestreada y cuya periodicidad es de la magnitud de la celda de la red (por ejemplo, una secuencia estratiforme mineralizada, en que los miembros con mineralización se suceden en forma regular). Detectada esta situación, en base al levanta-

tamiento geológico, puede usarse algún sistema para romper la periodicidad (por ejemplo, sobreponer una nueva cuadrícula rectangular y descargar los puntos originales en ella). Esta situación también puede suceder al muestrear afloramientos, sin regularidad, los cuales pueden estar relacionados con alguna característica especial de la roca

(cresta de anticlinales, dureza mayor por silicificación, etc.).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La fuente de variación, calidad del ajuste y coeficientes de correlación para las superficies de grado 1, 2 y 3 se indican en la Tabla 2.

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIES DE GRADO 1, 2 y 3

Superficie	Suma cuadrad. debida a la tendencia	Suma cuadrad. debida a los residuales	Variación total	Bondad de ajuste	Coefficiente correlación
grado 1	3261,87	45500,88	48762,75	6,69	0,2
grado 2	8787,31	39975,44	48762,75	18,02	0,4
grado 3	9516,75	39246,00	48762,75	19,52	0,4

Del análisis de los datos se desprende que la calidad del ajuste es mala, por lo tanto, la interpretación de los resultados debe hacerse en forma cuidadosa y a la luz de toda la información disponible. En cuanto al grado de la superficie, se observa que la de orden 2 implica un incremento en la calidad del ajuste, de aproximadamente 3 veces, respecto a la de grado 1, en tanto que, al aplicar la superficie de orden 3, el incremento en la calidad del ajuste es mínima (de 18,02% a 19,52%).

Los coeficientes de los polinomios calculados para cada superficie considerada son:

Superficie de grado 1:

$$Y' = 43,97 + 1,05 X_1 + 0,74 X_2$$

Superficie de grado 2:

$$Y' = 29,47 + 1,22 X_1 + 0,98 X_2 + 0,33 X_1^2 - 0,36 X_2^2 + 0,023 X_1 X_2$$

Superficie de grado 3:

$$Y' = 38,44 - 6,93 X_1 + 1,69 X_2 + 1,30 X_1^2 + 0,09 X_2^2 - 0,09 X_1 X_2 - 0,02 X_1^3 - 0,05 X_2^3 + 0,09 X_1^2 X_2 + 0,09 X_1 X_2^2$$

La Fig. 5 representa la superficie de grado 1; en ella se observa claramente un incremento regional de los valores de cobre en dirección noreste. La Fig. 6 muestra el mapeo de los valores residuales de la superficie de grado 1 (valores originales de

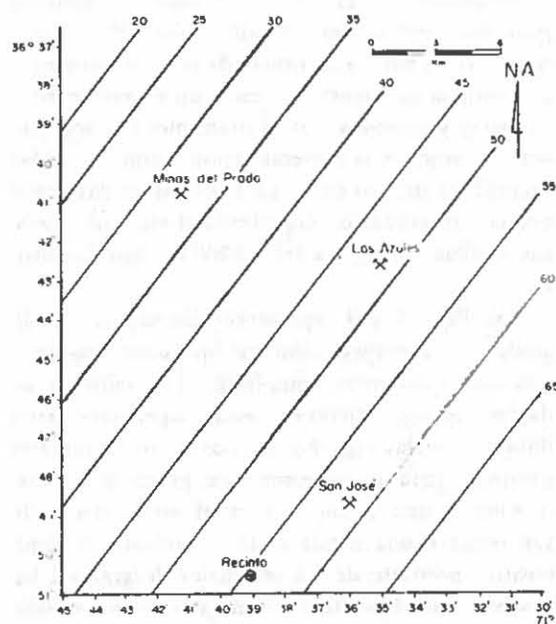


Fig 5 Superficie de tendencia de grado 1

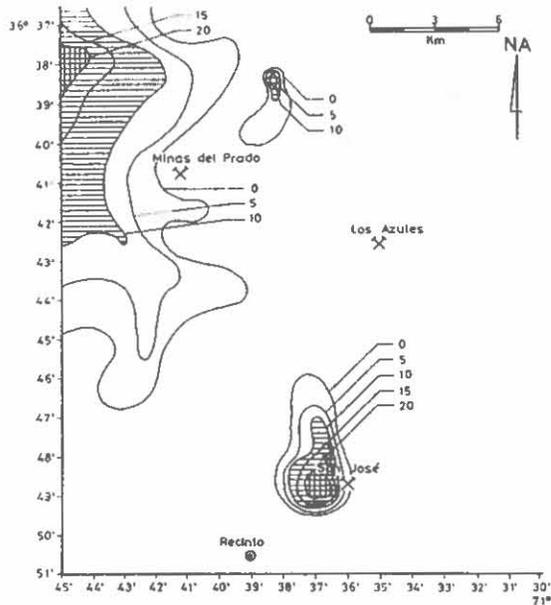


Fig. 6: Plano de residuos para la superficie de tendencia de grado 1 (Cu)

Residuales $> \bar{X} + 3S$

cobre, menos los valores estimados o tendencia regional); los valores de corte para mapear los residuales se han elegido arbitrariamente como $\bar{X} + S$ y $\bar{X} + 3S$.

Se observan tres zonas con valores residuales positivos, que se denominan "zona NW", "zona N" y "zona SW". La primera de ellas se sobrepone a la amplia cobertura de sedimentos cuaternarios, en parte originados por el granitoide; la segunda zona se asocia a la mineralización incipiente en las vecindades del río Cato. La zona SW es explicada por la mineralización cuprífera del río San José y sus vetillas periféricas (ríos Chillán, San Juanito, etc.).

Las Figs. 7 y 8 representan las superficies de grado 2 y 3, respectivamente, las cuales muestran una forma simétrica complicada. Los valores residuales correspondientes a estas superficies están dibujados en las Figs. 9 y 10. Los valores residuales positivos para la superficie de grado 2, corresponden a una pequeña área al norte (con dos sub-áreas) y una nítida zona al suroeste; la zona positiva noroeste de los residuales de grado 1 ha desaparecido. Los valores residuales positivos para la superficie de grado 3 muestran una anomalía en la zona del río San José.

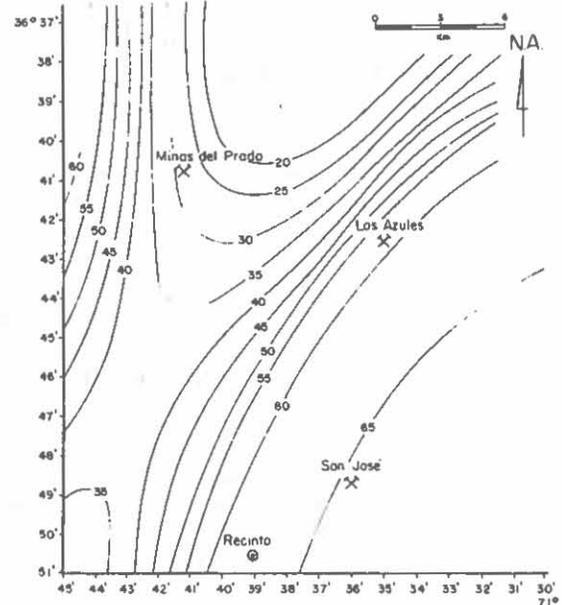


Fig. 7: Superficie de tendencia de grado 2

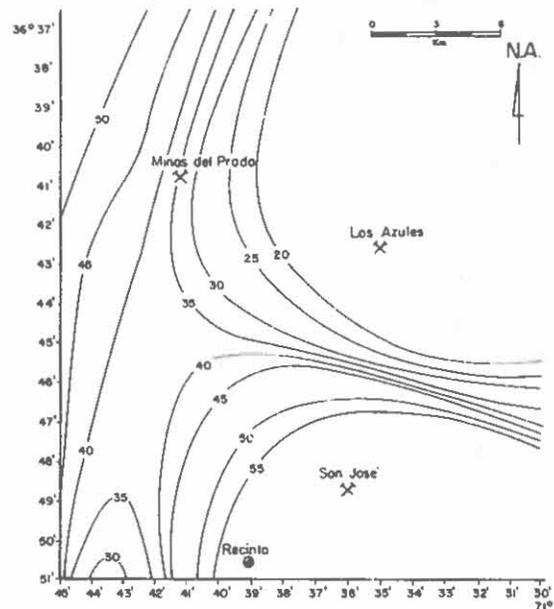


Fig. 8: Superficie de tendencia de grado 3

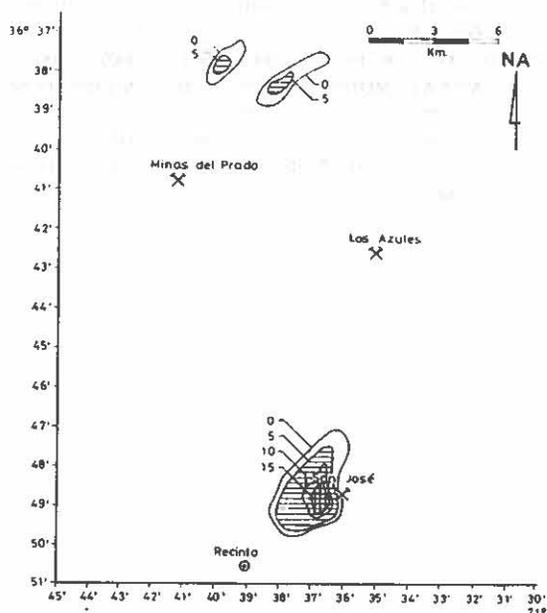


Fig. 9: Plano de residuales para la superficie de tendencia del grado 2 (Cu)

Residuales $> \bar{X} + 3.5$

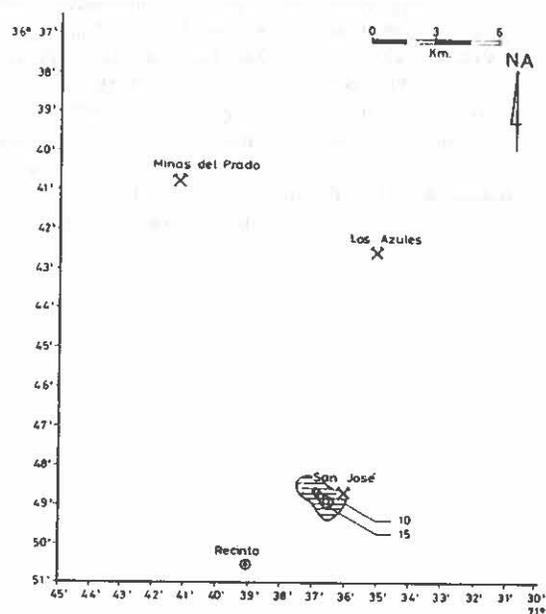


Fig. 10: Plano de residuales para la superficie de tendencia de grado 3 (Cu)

Residuales $> \bar{X} + 3.5$

CONCLUSIONES

El estudio de la distribución de los contenidos de cobre, mediante el análisis de la superficie de tendencia, permite visualizar una clara anomalía geoquímica que se interpreta como relacionada con la mineralización diseminada en las márgenes del río San José y sus tributarios.

Se considera, en base a la simplificación progresiva de los datos, que la superficie de grado 3 es suficiente para mejorar la interpretación geoquímica,

aun cuando se logra una mayor reducción relativa de la información al pasar de la superficie de grado 1 a la de grado 2.

El análisis de la superficie de tendencia constituye una valiosa herramienta estadística, para la interpretación de información geoquímica, cuando se dispone de poca densidad de datos en áreas extensas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado en el Instituto de Mineralogía, Petrología y Geología Económica, Universidad de Tohoku, Japón. El autor agradece

al Profesor Doctor A. Sugaki las facilidades otorgadas para su realización.

REFERENCIAS

ALFARO, G. 1980. Aplicación de dos técnicas estadísticas en la interpretación de datos geoquímicos en prospección minera. *Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile*, No. 11, p. 77-90.

ALLEN, P.; KRUMBEIN, W.C. 1962. Secondary trend components in the top Ashdown pebble bed: a case history. *J. Geol.*, Vol. 70, No. 5, p. 507-538.

CHAYES, F. 1970. On deciding whether trend surfaces

- of progressively higher order are meaningful. *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 81, No. 4, p. 1273-1278.
- DAVIS, J. 1974. *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., 550 p. N. York.
- FUENZALIDA, H. 1965. Orografía. *In Geografía Económica de Chile*. [Texto refundido]. Corp. Fomento de la Producción (CORFO), p. 7-33. Santiago.
- GONZALEZ, O.; VERGARA, M. 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los

paralelos 35° y 38° latitud sur. *Univ. Chile, Depto. Geol., Publ.*, No. 24, 104 p.

- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS: METAL MINING AGENCY OF JAPAN. 1978. Informe de reconocimiento geológico del área Coihueco (Ñuble) - Lonquimay (Malleco), zona Central-Sur de Chile. (Inédito) 352 p. Santiago-Tokyo.