



C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1979

05.79.10 al
05.79.14



COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA
Y COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR

CURSO LATINOAMERICANO DE EVALUACION DE INDICIOS URANIFEROS

TOMO II

1º de Agosto - 30 de Noviembre
BUENOS AIRES
1979



COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA
COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR



**CURSO LATINOAMERICANO
DE EVALUACION DE INDICIOS URANIFEROS**

Buenos Aires, 1° de Agosto - 30 de Noviembre de 1979

CNEA-AC-20/79

GEOESTADISTICA APLICADA A LA EXPLORACION Y ESTIMACION
DE RESERVAS. EL HISTOGRAMA COMO ESTIMADOR DEL VARIOGRAMA
VERDADERO Y SU AJUSTE AL MODELO TEORICO ADECUADO.
APLICACIONES PRACTICAS VARIAS SEGUN REPRESENTACIONES
LOG-ARITMETICAS Y BI-ARITMETICAS

HUGO NESTOR LUCERO MICHAUT

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

BUENOS AIRES
AGOSTO-NOVIEMBRE 1979

GEOESTADISTICA APLICADA A LA EXPLORACION Y ESTIMACION
DE RESERVAS. EL HISTOGRAMA COMO ESTIMADOR DEL VARIOGRA
MA VERDADERO Y SU AJUSTE AL MODELO TEORICO ADECUADO.
APLICACIONES PRACTICAS VARIAS SEGUN REPRESENTACIONES
LOG-ARITMETICAS Y BI-ARITMETICAS

HUGO NESTOR LUCERO MICHAUT

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

I. INTRODUCCION Y GENERALIDADES

Aunque umbilicada originariamente a la "Teoría de las Variables Independientes", vale decir al amplio campo de la "Estadística" regida por las leyes del azar puro, la "Teoría de las Variables Regionalizadas" ha ido adquiriendo a partir de 1962 a raíz de las fundamentales investigaciones de G. Matheron -cabeza de la Escuela Geoestadística Francesa- importancia y desarrollo cada vez mayores; esta nueva ciencia llamada "Geoestadística" cubre el lato espectro abarcado por todos aquellos fenómenos estadísticamente regidos y que actúan sobre andamiajes caracterizados por alguna suerte de interdependencia geográfico-espacial.

Como la acertada denominación de "Geoestadística" lo sugiere, este conjunto de disciplinas se identifica con un tratamiento basado en "Variables Aleatorias", de relaciones sólo geológicamente extractables, siendo la ligazón entre ambas concepciones de carácter necesario y apodíctico.

Uno de los más destacados cultores actuales de esta ciencia acaba de referirse a este nexo en uno de sus recientes

trabajos (1): if the "geo" is forgotten, the "statistics" has no reason to be good.

La Geoestadística se define como "la práctica de la Teoría de las Variables Regionalizadas".

Continuando en el campo de las definiciones, puede decirse con Matheron y sus seguidores, que una "regionalización" consiste en el desplazamiento espacial o temporal de fenómenos expresables por medio de magnitudes que pueden ser, entre otras: 1) tenores de un yacimiento (espacio tridimensional); 2) potencias mineralizadas de un yacimiento (espacio bidimensional); 3) precio de un producto minero (dimensión temporal), etc., etc.

Las Variables Regionalizadas se presentan bajo dos aspectos aparentemente contradictorios pero en realidad intercomplementarios, tales como: 1) una faz aleatoria puesta en evidencia por las acentuadas irregularidades existentes entre los datos experimentales puestos en juego, y 2) un aspecto muy particular de naturaleza estructural propio del fenómeno regionalizado subyacente y que en general suele permanecer vedado a la observación geológica directa.

Esta aparente antinomia deja de ser tal en la medida en que puede llegar a ser más o menos claramente expresada por intermedio del lenguaje de raíz probabilística entroncado a los fenómenos aleatorios.

En cuanto a los objetivos de la Teoría de las Variables Regionalizadas, pueden reconocerse dos principales; uno de naturaleza teórica y otro de índole práctica.

Objetivo teórico: expresión de las características estructurales de un fenómeno de regionalización mediante una determinada formulación matemática.

Objetivo práctico: satisfacer el planteamiento de la estimación de una Variable Regionalizada en base a los resultados de un muestreo yacimientoológico no regular.

La Geoestadística, para la resolución de los problemas específicos mencionados, ha liberado dos grupos de metodologías diferentes, a saber:

(1) Michel David et al. 1977. 15th. A.P.C.O.M. Symposium Brisbane-Australia: "The practice of porphyry copper deposits estimation for grade and ore-waste tonnages demonstrated by several studies.

- Los métodos transitivos, que son de raíz geométrica y que se dividen en los dos siguientes: el covariograma geométrico y el co variograma transitivo, que no serán tratados en este espacio; sólo de manera muy incidental se expondrá un ejemplo de la apli cación del último.
- La Teoría Intrínseca que se sirve del lenguaje de las Funciones Aleatorias y cuyo principal instrumento de investigación es la función $\gamma(d)$, llamada "Hemivariograma" o "Ley de Dispersión Intrínseca" que consiste en la diferencia cuadrática media entre las variables $Y(x + h)$ e $Y(x)$; en general,

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} E [Y(x + h) - Y(x)]^2$$

II. PRINCIPALES MODELOS TEORICOS Y AJUSTE DE LOS VARIOGRAMAS EXPERIMENTALES EMERGENTES DE MUESTREOS YACIMIENTOLOGICOS

La consecución de elementos de base para la elaboración de un variograma experimental cualquiera, se efectúa mediante una tarea de mediciones físicas y muestreos para análisis químicos realizados en la forma más regular posible; 1) en el caso de un yacimiento filoniano o estratiforme vertical o subvertical podrá operarse en "canaletas" a intervalos regulares, y 2) tanto en el de un criadero estratiforme o filiniano horizontal o subhorizontal como en el de un cuerpo de tipo "amas, preferentemente según perforaciones a malla táctica.

Contándose con todos los datos necesarios puede realizarse simultáneamente el estudio del comportamiento de a) los tenores químicos, b) las potencias mineralizadas, y c) las acumulaciones potencia-tenor.

Un variograma experimental determina normalmente el trazo de una línea zigzagueante poseedora de una incrementación inconstante e irregular hacia la derecha hasta la zona de independencia de las funciones (ver Fig. 2).

En cuanto a los distanciamientos que habría que dar a los muestreos de base a efectuar para los fines de referencia, la experiencia acumulada aconseja que no deben rebasar una cuarta parte de la magnitud del campo mineralizado en estudio.

Dado que las curvas experimentales brindadas por las representaciones bi-aritméticas no significan en el mejor de los casos nada más que un "estimador" del variograma verdadero, el subsiguiente paso tendiente a lograr la aproximación probabilística más acorde con la realidad existente, consistirá en definir el modelo o variograma teórico reinante que regirá el futuro planteamiento de las geointerpretaciones a realizar.

En la determinación del tipo modelístico predominante in

fluyen con mucho peso las siguientes circunstancias:

A) el comportamiento de la curva en el origen, y B) la existencia o inexistencia de niveles de acotamiento en los gráficos resultantes.

A) Con respecto al primer punto, se recordarán los cuatro esquemas básicos de comportamiento de $\gamma(d)$ en origen, más conspicuos y tipificados que definen más o menos satisfactoriamente el grado de continuidad de los fenómenos de regionalización más frecuentes en la naturaleza (Serra Jean, 1968).

El primer caso (ver Fig. 2.a) refleja el de una variable de elevado grado de continuidad funcional que suele darse por ejemplo en los casos de potencias de estratos mineralizados; se caracteriza por una función intrínseca con comportamiento inicial parabólico y puede ser formulada muy en general de la siguiente manera: $\gamma(d) = d^2$.

El segundo (ver Fig. 2.b) indica un grado de continuidad medio en las regionalizaciones representadas, caracterizándose gráficamente por una tangente oblicua en el origen; suele darse en las representaciones de acumuladas potencia-tenor y en general puede dejarse formular como sigue: $\gamma(d) = d$.

El tercero (ver Fig. 2.c) corresponde a variables muy irregulares caracterizadas por la magnitud del despegue inicial propio de un efecto pepítico más o menos acentuado, según el caso; tal efecto puede deberse tanto a un real efecto "nugget" como a errores de medición, y aún a la presencia de estructuras o regionalizaciones que la escala de muestreo no ha sido suficiente para poner en evidencia gráfica. Puede formularse así: $\gamma(d) = \sqrt{d}$

El cuarto y último esquema (ver Fig. 2.d) corresponde a efectos aleatorios puros que independizan totalmente a $\gamma(d)$ de "d", no habiendo diferencia alguna entre la posición, según ordenadas, del origen y de la meseta.

Entre los dos extremos representados por los casos primero y cuarto se ubica toda la gama de estados intermedios que integra el campo tan específico de la ciencia geoestadística.

B) En la tarea de decidir el ajuste de un histograma experimental a un modelo teórico determinado, será necesario trazar cuidadosamente el gráfico-problema en forma bi-aritmética a los efectos de llevarlo a comparación con un grupo de esquemas tipificados y ya matemáticamente formulados existentes en la bibliografía correspondiente; puede también recurrirse a alguna forma de combinación de diferentes esquemas.

En primer lugar es necesario distinguir entre dos tipos de esquemas generales: 1) acotados, es decir poseedores de un valor finito para $\gamma(d)$ y por lo tanto caracterizados por la pre-

sencia de una "meseta" que señala el arribo a una zona de total independencia entre las funciones $Y(x + h)$ e $Y(x)$, y 2) esquemas no acotados en los que los valores de $\gamma(d)$ podrían seguir creciendo indefinidamente.

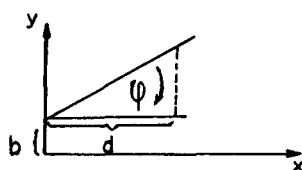
B.1) Entre los segundos, es decir los carentes de limitación superior, se señalarán el "wijsiano" y el "lineal".

- El esquema de De Wijs (ver Fig. 3.a) de tanta utilidad en la geoestadística aplicada a medios isótropos y/o geoméricamente anisótropos, está regido por la relación: $\gamma(d) = 3 \alpha \ln d$; una importante limitación en el empleo de esta función aleatoria se encuentra sin embargo, dada por el hecho de que al carecer de un acotamiento cuspidal, no es capaz de suministrar informaciones sobre los valores de alcance de la influencia real existente entre las muestras en juego. Un empleo muy particular del mismo permite el cálculo del coeficiente de dispersión intrínseca " α " que define la dispersión del fenómeno al estado puro, con total prescindencia tanto de la geometría del campo mineralizado como del volumen de la muestra, vale decir del "soporte"; pero para darle este empleo es necesario construir el variograma sobre un gráfico logaritmético capaz de brindar un "variograma medio" identificado con una recta, dado que para el caso, la representación bi-aritmética es bastante inoperante en razón de la inseguridad de las extrapolaciones a efectuar sobre una curva que excede el margen determinado por los puntos figurativos (ver Fig. 4.a y 4.b).
- El esquema lineal (ver Fig. 3.b) tampoco posee limitación cuspidal o acotamiento, razón por la cual no admite una "covarianza" y carece tanto de "meseta" como de "alcance" finito, siendo por ello incapaz de brindar información sobre zonas de influencia de una muestra.

El valor de la varianza es en general $\gamma(d) = \text{tg}\psi \cdot d$, que en el caso de un efecto pepítico se torna:

$$\gamma(d) = C_0 + \text{tg}\psi \cdot d$$

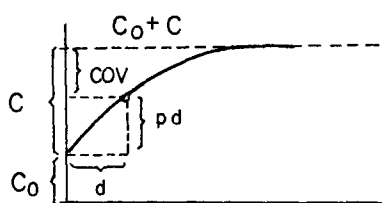
En efecto, y generalizando se trata de una función lineal común, de la forma: $y = mx + b$, en la que $\Delta y / \Delta x = m = \text{tg}\psi$ es constante, siendo "b" la ordenada en el origen.



B.2) Entre los esquemas poseedores de meseta (o palier) se mencionarán los siguientes: el modelo "exponencial" o "formeryano", el "gaussiano" (también de naturaleza exponencial), el "esférico" o "matheroniano", etc.

Todos ellos se caracterizan por admitir un valor de covarianza, siendo la varianza $\gamma(d)$ igual a $C_0 + p.d$, y el valor de covarianza: $cov. = C_0 + C - \gamma(d)$, luego $Cov. = C_0 + C - C_0 + p.d$, de donde

$$\underline{Cov. = C - p.d}$$



En el caso general, la intersección de la curva variográfica depurada con la línea de nivel de meseta, determina el "alcance" (o portée) es decir el radio de influencia de una muestra dentro de un determinado yacimiento.

Los objetivos inmediatos o proximales a obtener de la interpretación de variogramas acotados, son los siguientes: " C_0 " o efecto pepítico; " $C_0 + C$ ", o meseta, " $C_0 + C_1$ " o submeseta, etc como parámetros escalares, y " a " o alcance, " a_1 " o subalcance, etc como parámetros vectoriales, y la determinación de las zonas liminares de dependencia-interdependencia de funciones, entre otras cosas.

Los resultados finales a obtener consisten en, 1) determinación, cuantificación y descripción de las estructuras existentes, 2) determinación de la existencia de anisotropías (en este caso también su carácter), y 3) cálculo de varianzas de estimación minimizadas mediante aplicaciones de Krigismo.

- El esquema "formeryano" (ver Fig. 3.c) se caracteriza por el hecho de que la curva del variograma depurado llega a intersecar al nivel de meseta sólo en el infinito; en efecto, siempre permanecerá por debajo de éste, razón por la cual la determinación del alcance debe llevarse a cabo por prolongación analítica de la pendiente del tramo inicial del variograma corregido.

Siendo p (pendiente en el origen) = C/a , la determinación del alcance " a " se efectúa de acuerdo al lineamiento siguiente: $C = tg.\psi.a$, de donde, $a = C/tg\psi$ en el origen.

Este modelo se rige por la ecuación siguiente: $\gamma(d) = C_0 + C [1 - e^{-d/a}]$, para cuando la distancia de comparación de muestras, "d", llega a ser igual o mayor que "a", es decir, $d \geq a$, se tiene: $\gamma(d) = C_0 + C [1 - 1/e]$.

- El esquema "matheroniano" (ver Fig. 3.d) proporciona el valor del C_0 de los alcances, directamente de la intersección variograma/meseta, y se rige por la ecuación siguiente:

$$\gamma(d) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{d}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a} \right)^3 \right]$$

y cuando $d \geq a$, $\gamma(d) = C_0 + C$

Se observa que la pendiente en el origen debe ser igual, teóricamente, a $3/2 \cdot C/a$; en el caso de presentarse estructuras "folimórficas", en este modelo como en general en los restantes, es posible determinar la existencia de subalcances, puestos en evidencia por alguna brusca inflexión en las pendientes variográficas.

- El esquema "gaussiano" (ver Fig. 3.e) posee también carácter exponencial, dado la ubicación de la variable en la fórmula, y se desarrolla de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$\gamma(d) = C_0 + C \left[1 - e^{-(d/a)^2} \right]$$

valiendo en general para este modelo condiciones muy similares a las señaladas para el caso formeryano, ya que la curva variográfica se identifica con la meseta al infinito.

III. FORMAS DE REPRESENTACION GRAFICA DE LA FUNCION VARIOGRAMICA Y HEMIVARIOGRAMICA

Se emplean dos formas de llevar al gráfico las funciones de este tipo, descansando la elección de las mismas en la naturaleza de los objetivos en cada caso perseguidos.

De cualquier modo, los valores que se colocan sobre ordenadas (varianzas o hemivarianzas de tenores, potencias o acumulaciones) deberán ser siempre de carácter aritmético, a la par que los representados sobre abscisas (intervalos métricos de muestreo) pueden serlo aritmético o log-aritméticamente.

- La representación log-aritmética no posee la ductilidad ni la largueza en cuanto a consecución de resultados que caracterizan a la de raíz aritmética; su aplicación más específica se relaciona a la obtención del coeficiente " α " de dispersión intrínseca,

que teóricamente debería efectuarse sólo en presencia de esquemas "wijsianos", es decir en aquellos casos en que se deba operar en medios isótropos o geoméricamente anisótropos en los que basta con hacer variar las direcciones de investigación para restablecer la isotropía realmente reinante.

La definición de un esquema (wijsiano)(1), si se aplica como normalmente se hace, a la primera serie francamente ascendente de varianzas -con prescindencia de los valores correspondientes a la zona mesetiforme que generalmente se presenta hacia la derecha de aquella- no es lo suficientemente precisa como para propiciar sobre una representación log-aritmética una clara distinción entre este modelo y algún otro de los restantes arriba descriptos.

En efecto, esta circunstancia y el hecho de que este tipo de representación se traduce en un "variograma medio" identificado con "una recta proyectable al infinito" retacean sensibilidad a la metodología en el sentido de que no permite definir exactamente en qué esquema se está trabajando en realidad.

La principal aplicación de esta representación estriba como ya se ha adelantado, en la posibilidad de poder calcular el coeficiente alfa de dispersión intrínseca, no sólo en general y para la totalidad de un depósito(2), sino para las diferentes direcciones horizontales y aún la vertical de los cuerpos mineralizados en estudio.

El caso expuesto en Fig. 4.b) libera la forma en que se ha calculado el referido parámetro para una dirección determinada (la Norte-Sur para el yacimiento "Rodolfo" - Córdoba) según un muestreo metro a metro efectuado en "canaleta", partiendo de la fórmula general $\sigma_d^2 = "B" + 6\alpha \text{Ln}.d$ (Carlier A., 1964.).

Sobre el gráfico se sacará en primer lugar la diferencia entre las varianzas determinadas por la intersección del "variograma medio" con las ordenadas correspondientes a $d = 1m$ y $d = 10m$ (o $d = 2m$ y $d = 20m$, etc, aplicando la proyectabilidad al infinito de la recta que representa el "variograma medio").

(1) Una distribución espacial (p.ej. tenores) obedece a un esquema de De Wijs cuando las varianzas entre muestras progresivamente más alejadas entre sí, se incrementan conforme a los logaritmos de las distancias.

(2) Este cálculo se efectúa mediante la aplicación de los "equivalentes lineales" con la fórmula de Matheron-Wijs.

$$\text{Teniendo } d = 1\text{m}, \sigma_{d_{1\text{m}}}^2 = "B" + 6\alpha \ln.1 = "B"$$

$$\text{y } d = 10\text{m}, \sigma_{d_{10\text{m}}}^2 = "B" + 6\alpha \ln.10$$

y siendo "B" = 0,37, reemplazando, se tiene

$$1,09 = 0,37 + 6\alpha.2,3$$

$$\text{y } \alpha = \frac{1,09 - 0,37}{6.2,3} = \underline{\underline{5,22 \%}}$$

Una desventaja de la representación según abscisas logarítmicas es la de que su variograma no es capaz de detectar ni de cuantificar la presencia de un efecto pepítico, en razón de la inexistencia de una ordenada identificable con el cero u origen.

Como puede verse, de la Fig. 4.a) no puede extractarse con buen margen de seguridad el valor de alfa, dado la inseguridad del trazado de una curva según extrapolación al infinito. Como se puede observar, en la representación log-aritmética se ha operado exclusivamente en la forma variográfica, porque la de tipo hemivariograma no agregaría ninguna ventaja sobre la primera; el efecto de pepita aparece duplicado.

- La representación bi-aritmética -específicamente la hemivariograma- ofrece una gama mucho mayor de posibilidades interpretativas que la anteriormente descrita, tanto por la existencia de un origen en cero, como por la sensibilidad propia de una traza curva y las relaciones existentes entre ésta y la línea de nivel de meseta, cuando la hay.

Entre los muy variados aspectos y aún matices de los mismos que estas metodologías permiten, merecen citarse los siguientes: 1) entre los de carácter escalar, el efecto pepítico (C_0) y la dimensión de varianza "C" que mide la amplitud de una regionalización (eventualmente también las subdimensiones de varianza "C1", "C2", etc); 2) entre los vectoriales, el alcance "a" y eventuales subalcances "a1", "a2", etc que traducen la magnitud física de las regionalizaciones de diverso orden existentes dentro del campo estudiado; 3) la existencia de isotropías o anisotropías en el ámbito de un depósito, y dentro del caso particular anisotrópico, la determinación del tipo a que puede corresponder (geométrica o zonal); 4) posible existencia de algún fenómeno de deriva yacimientológica que en su representación hemivariográfica se pone en evidencia por la actitud parabólica de la curva correspondiente; 5) cambios en el carácter de un hemivariograma que pudiendo haberse iniciado bajo un carácter netamente intrín-

seco, después de cierto desarrollo en meseta, comienza a incrementarse acentuadamente dando lugar a fenómenos de estacionariedad local (ver Fig. 6.c).

Seguidamente se ampliará el contenido y alcance de algunos de los conceptos arriba mencionados; con respecto al punto 1) cabe señalar que si bien una representación en variograma brinda todos los resultados que puede proporcionar la hemivariogramática, ésta última posee la ventaja de suministrar en forma directa los valores de los efectos "nugget" (C_0) -en caso de haberlos- y de la amplitud (C) o subamplitudes (C_1, C_2 , etc) eventualmente existentes, a la par que la primera los presenta multiplicados por dos.

En casos en los que la gran irregularidad de disposición bi-espacial de los puntos figurativos de una representación (por ej. tenores en histogramas acotables) tornen muy dudoso el trazado de la línea de nivel de meseta ($C_0 + C$), puede recurrirse al cálculo de la varianza a priori, la que teóricamente debería identificarse con tal nivel.

En lo referente al punto 2) se recordará que los valores de "alcance" (" a ") o subalcances (a_1, a_2 , etc) significan el radio medio de influencia según rumbo, o según una dirección escogida conforme al tipo de yacimiento de que se trate. En un trabajo en realización (Lucero Michaut, 1979) se propone, a efectos de uniformar criterios, la adopción de una nomenclatura basada en dimensionalidades absolutas, ya en uso en varios países (V. Nemeč, 1970) de acuerdo a la cual, los tipos de regionalizaciones o vertebración interna de un fenómeno estructural con los que normalmente se tropieza en las investigaciones yacimientológicas de este tipo, podrían ubicarse básicamente entre las tres siguientes: miniestructuras (entre 0,012 mm y 6 mm); macroestructuras (entre 0,012 m y 6,1 m) y megaestructuras (entre 12,2 m y 6227 m); caben las mismas consideraciones para las regionalizaciones ligadas a las potencias mineralizadas y las acumulaciones potencia-tenor.

Una regionalización medida en más de una dirección por diferentes líneas de investigación (horizontales y vertical, por ej.) puede brindar la realidad objetiva de una estructura de traza elíptica y aún elipsoidal.

Punto 3). Una anisotropía puede ser "geométrica" o "zonal"; la investigación variogramática de un determinado yacimiento, efectuada según diferentes direcciones (un yacimiento estratiforme subhorizontal o uno de tipo "amas", por ej.) puede brindar: a) un hemivariograma poseedor de una meseta única y diferentes "alcances" puestos en evidencia por sus propias y específicas pendientes generales, poseyendo en el caso cada dirección su zona de influencia particular. Como ya se adelantó, una representación planimétrica del fenómeno puede ofrecer una "elipse de alcances" en contraposición con el clásico "círculo de alcan-

ces" de la concepción isotrópica pura. En el caso de anisotropías geométricas, un adecuado cambio de direcciones de estudio puede restablecer el carácter realmente isotrópico del "pattern" covariánico subexistente. En la investigación espacial tridimensionada suelen darse casos en los que la variable llega a comportarse más uniformemente sobre las direcciones horizontales que según la vertical. Este tipo de esquema corresponde a una anisotropía zonal, caracterizada entre otras cosas por la existencia de más de un nivel de mesetas.

Un caso muy particular de las regionalizaciones consiste en una superposición espacial de estructuras que, poseedoras de diferentes escalas dimensionales, se presentan con carácter interencajante.

La presencia de tales estructuras ("les structures gigognes" de la literatura geoestadística francesa, o "folimórficas") dentro de un determinado depósito puede quedar en evidencia como resultado de una investigación variográfica muy elaborada y que haya dado lugar a la determinación de diferentes valores de "alcançe" para una misma dirección; tales valores pueden haber sido detectados: a) en los esquemas acotados, por la intersección del "modelo teórico" con el nivel de meseta; b) por bruscas inflexiones en la curva del "modelo teórico", y c) por la existencia de efectos pepíticos acentuados, capaces de reflejar la existencia de estructuras o regionalizaciones de orden menor -no cuantificables- que la escala de trabajo (mucha distancia entre muestras) no ha sido capaz de graficar ni de cifrar métricamente.

IV. ALGUNAS INTERPRETACIONES MODELÍSTICAS DE HISTOGRAMAS DE YACIMIENTOS ARGENTINOS Y REGIONALIZACIONES PARTICULARES DETECTABLES

El abundante material químico-analítico obtenido de detallados muestreos realizados con la finalidad de recopilar datos para la elaboración de Rectas de Correspondencia radiactividad-tenor para varios yacimientos ubicados en el ámbito de la Delegación Centro de la CNEA, ha proporcionado incidentalmente una interesante fuente de elementos geoestadísticamente explotables y capaces de traducir sus comportamientos hemivariográficos según la dirección vertical.

a) Yacimiento "El Infierno" (Prov. de La Rioja)

El hemivariograma de tenores expuesto en Fig. 5 pone en evidencia un esquema "formeryano" en el que la meseta $\gamma(d) = C_0 + C = 0,44$ está dada por la hemivarianza de aquellos. Este modelo exponencial corresponde a la fórmula general:

$$\gamma(d) = C_0 + C [1 - e^{-d/a}]$$

En el esquema puede determinarse un valor de alcance "a" = 3m, magnitud cuyo duplo representa la dimensión de la regionalización; ello significa que dentro de este complejo mineralizado la periodicidad de los "ore-shoots" posee -en lo vertical- una longitud de onda del orden de los 6 m (macroregionalización de orden 21). En cuanto al minúsculo efecto de pepita existente ($C_0 = 0,02$) su significación no justifica la hipótesis de la presencia de alguna estructura de orden menor a la gráficamente detectada, pudiéndoselo atribuir más bien a un real efecto "nugget" o a errores de medición en el trabajo de muestreo.

b) Yacimiento "La Estela" (Prov. de San Luis)

En lo tocante a la investigación del comportamiento hemivariográfico según la dirección vertical, se exponen en Fig. 6.a) los resultados obtenidos de un muestreo efectuado sobre un frente de cantera, es decir a cielo abierto, correspondiente al cuerpo superior del yacimiento de referencia; tal muestreo, realizado con un ritmo métrico medio de 0,5 m brindó según ese tipo de representación un esquema muy definido de tipo "esférico" regido por la ecuación general:

$$\gamma(d) = C_0 + C \left[3/2 \cdot d/a - 1,5(d/a)^3 \right]$$

En el mismo puede advertirse un efecto $C_0 = 0,09$ y dos regionalizaciones medidas según amplitud por los parámetros escalares C_1 y C_2 cuya suma conjunta y adicionada a C_0 , brinda un valor de 0,81 identificado con la magnitud de la hemivarianza de tenores de la distribución.

La posición de los dos "alcances" detectados revela la existencia de dos estructuras interencajantes de diferente rango, una menor poseedora de un radio de 1,4 m y otra que la incluye ostentando un valor de $a_2 = 4$ m, todo lo que da lugar a la hipótesis de que se está en presencia de una vertebración estructural de tipo "gigogne" o "folimórfico".

El efecto pepítico es poco significativo, lo que indica que es poco probable que existan otras estructuras de orden menor que las mencionadas.

- Otro muestreo efectuado a lo largo del rumbo del mismo cuerpo y mayormente llevado a cabo mediante perforaciones radievaluadas, sobre distanciamiento mucho mayores (promedio 19 m) proporcionó otra serie de datos susceptibles de conformar esquemas interpretables; este muestreo se efectuó con fines evaluativos (Noya J.M., 1977).

El hemivariograma de tenores (Fig. 6.b) que se presenta también como de tipo matheroniano muestra sobre ordenadas una regionalización de amplitud $C = 0,56$ y un efecto C_0 un tanto acen-

tuado que comporta la suposición de la existencia de estructuras menores que el gran distanciamiento del muestreo impide detectar. La única estructura señalada por el gráfico corresponde a una megaregionalización de orden 15-16 extendida de Este a Oeste, es decir sobre rumbo.

El hemivariograma de potencias mineralizadas, estimado también sobre los mismos alejamientos medios mencionados (ver Fig. 6.d) revela la existencia de una estructura única de alcance "a" = 80 m identificada con una megaregionalización de orden 16-17; se recordará que el "alcance" mide sólo el radio medio de una determinada regionalización. Como es natural en los variogramas de potencias mineralizadas, no existe efecto pepítico C_0 .

Esta misma estructura es también puesta en evidencia en el hemivariograma de acumulaciones potencia-tenor (ver Fig. 6.c). Es interesante observar el diferente comportamiento de la curva, que es netamente intrínseco hasta las inmediaciones del "alcance" "a" = 80 m, a partir de donde la misma comienza a crecer acentuadamente adoptando caracteres locales propios de la existencia de una deriva.

c) Yacimiento "Schlagintweit" (Prov. de Córdoba)

Una investigación variográfica de tenores químicos efectuada según la dirección vertical de acuerdo a un ritmo métrico de $\approx 0,8$ m brindó los resultados que pueden visualizarse en la Fig. 7, en la que se percibe un ajuste al esquema "esférico"; el valor de $C = 0,074$ cuantifica la amplitud de la única regionalización encontrada, observándose también un acentuado efecto pepítico $C_0 = 0,033$ que posiblemente oculta alguna estructura menor.

Siendo la magnitud del "alcance", de 4,5 m, la longitud de onda del fenómeno físico-químico mineralizador existente parece ser del orden de los 9 m.

Un hemivariograma de investigación horizontal del mismo yacimiento, efectuado en base a un distanciamiento decamétrico, mostró un sensible ajuste al modelo matheroniano (Lucero M., 1979); la dirección más rica en datos de base, la NO-SE, permitió el trazado de dos diferentes alcances "a" = 18 m y "a₁" = 84 m correspondientes a dos megaestructuras de diferente orden dimensional, 18-19 la menor y 16 la segunda.

En cuanto a la dirección complementaria, de rumbo NE-SO, no logró brindar información muy confiable dado la escasa cantidad de datos puestos en juego; y la vertical, tratada a la misma escala de 10 m, menos aún, por las mismas razones.

- Un caso muy especial de las regionalizaciones eventualmente presentes en determinados campos mineralizados es el de las estructuras de tipo "gigogne" o "folimórficas" (Lucero M., 1979) que consisten en una superposición de regionalizaciones poseedoras de di

ferentes escalas y ordenadas en el espacio en forma interencajante.

Hay fenómenos de transición de orden centimétrico o milimétrico (microescala) que a una determinada escala de muestreo, por ejemplo penta o decamétrica (macro o magaescala) no llegan a manifestarse en la curva experimental de varianzas; su única exteriorización sería en el mejor de los casos, un efecto pepítico más o menos acentuado según el caso.

Las estructuras de radio mayor que las distancias de muestreo escogidas, son proporcionadas por el o los "alcances" que la conformación de la curva corregida y ajustada a un modelo es capaz de ofrecer; la de mayor rango se determina generalmente -en los modelos acotados- por la intersección del variograma ajustado con el nivel de meseta correspondiente a la varianza a priori, y la o las eventualmente coexistentes, por alguna brusca inflexión de la mencionada curva.

- Un interesante ejemplo de "folimorfismo" es el proporcionado por las investigaciones hemivariográficas efectuadas en el yacimiento "Rodolfo" (Delegación Centro - Córdoba) que forma parte del material a exponer en otro trabajo (Lucero M., 1979).

En este yacimiento se han efectuado dos tipos de muestreo; uno de sucesión monométrica, en canaleta, químicamente analizado y realizado en galería, que interesó sólo a una parte del cuerpo mineralizado sobre una potencia de entre 1 y 2 m⁽¹⁾, y otro de ritmo hectométrico dado por la separación entre perforaciones radievaluadas según la dirección Norte-Sur que interesaron al total de las potencias mineralizadas; se exploraron también otras direcciones en sentido horizontal que no se detallarán en esta exposición.

El análisis de ritmo monométrico sobre galería (ver Fig. 8) detectó un efecto pepítico $C_0 = 0,01$ que posiblemente enmascare una pequeña estructura (tal vez la misma reflejada por el $C_0 = 0,016$ del análisis variográfico hectométrico).

Esta pequeña estructura que sería la de más pequeño orden existente en el yacimiento, podría tener dimensiones de entre 6 mm y 5 cm de acuerdo a observaciones geológicas directas y que la escala de muestreo no ha alcanzado a cuantificar, ubicándose probablemente entre una micro y una macroregionalización de órdenes comprendidos entre 32 y 27.

(1) Se trata en realidad de todo un paquete sedimentario de unos 10 m de potencia dentro del cual se suceden desarrollos facoidales más densamente mineralizados que el resto, que desaparecen después de cierta continuidad sobre banco para ser reemplazados por otros similares hacia abajo, arriba, o a continuación sobre rumbo.

La siguiente estructura en orden creciente, sería la detectada directamente por el hemivariograma del muestreo monométrico de referencia (que contiene sólo datos parciales en cuanto a potencias mineralizadas) que brindando un "alcance" de 7,5 m, reveló la existencia de una regionalización de orden 19-20.

El muestreo efectuado con intervalos de 100 m puso en evidencia dos estructuras más; una de alcance " a_2 " = 175 m, megaregionalización de orden 15-16, y otra, la mayor, de alcance " a_3 " = 870 m identificada con una estructuración también megascalares pero de orden 13.

Si bien no es objeto de esta exposición poner de relieve todas las consecuencias estructurales emergentes de un análisis a fondo del total de estas representaciones variográficas, se agregará que la investigación complementaria realizada según la dirección Este-Oeste detectó la existencia de una regionalización poseedora de un valor de alcance " a_2 " = 175 m coincidente con una de las anteriores, y que la llevada a cabo según la dirección NE-SO logró detectar otra anomalía de este tipo señalada por un alcance " a_2 " = 240 m, todo lo que en conjunto tiende a reconstruir en el espacio a dos dimensiones una regionalización unitaria de traza elíptica.

V. ALGUNAS APLICACIONES PRACTICAS DE LA GEOESTADISTICA

A los efectos de no abundar innecesariamente en la enumeración y ejemplificación de las variadas aplicaciones posibles de la geoestadística a la resolución de problemas específicos sobre exploración y evaluación de yacimientos, sólo se hará referencia a un contado número de ellas, remitiéndose en cuanto a la mayor parte las restantes al trabajo (Lucero M., 1978) V.5 "Geoestadística y Estimación de Reservas de Uranio. Las Metodologías Geoestadísticas como Instrumentos de Investigación". Curso Latinoamericano de Capacitación para la Prospección de Yacimientos Uraníferos. O.E.A.

V.1. El empleo de los "Correctores" en la moderación de potencias mineralizadas anómalas

El uso de los Correctores (de Krige y de Matheron) -que consisten en extensiones del "Krigismo" dentro de un determinado campo- se ha centrado siempre en el tratamiento de los tenores "monstruos" (por exceso y por defecto) en los casos en los que dentro de un depósito explorado mediante perforaciones llegan a hacerse presentes valores exageradamente anómalos que contrastan en forma muy acusada con los puntos vecinos o con la mediana de todo el campo mineralizado.

A pesar de que el mismo problema suele plantearse con similar frecuencia con respecto al carácter localmente anómalo de las potencias mineralizadas de depósitos estudiados en la mis

ma forma, vale decir mediante sondeos, resulta extraño que no hayan sido objeto de un tratamiento y atención también especiales.

Algunas experiencias comprobatorias señalan la viabilidad de la aplicación de los mismos "Correctores" empleados para la morigeración de tenores, en la solución del problema específico de las "potencias mineralizadas".

A) Mediante el Corrector de Krige: el mismo posee fundamento estadístico y opera en base al previo conocimiento de los principales parámetros que definen el carácter de la distribución, expresados como varianzas, y a la suposición de encontrarse en esquema de repartición lognormal y en modelo wijsiano, dado que en los cálculos de ciertas varianzas complementarias debe intervenir el coeficiente de dispersión intrínseca. Esta metodología es de raíz sintética y deductiva.

Para la aplicación de la fórmula general de Krige:

$$z = m \left[u/m \right] \sigma_y^2 / \sigma^2 \cdot e^{\frac{\sigma_i^2 \cdot \sigma_y^2}{2\sigma^2}}$$

esta vez a las potencias mineralizadas, es necesario contar con una serie de datos, que para el caso de un determinado sector del yacimiento "Rodolfo" (Prov.de Córdoba) serían los siguientes:

α_h	(coeficiente de dispersión intrínseca)	1,63 %
σ_h^2	(varianza de muestras dentro del sector evaluado que se calcula a partir de los datos originales del muestreo)	0,282
D	(equivalente lineal del sector de yacimiento evaluado)	632 m
z	(equivalente lineal del sólido de influencia de un sondeo)	139 m
d	(equivalente lineal de la muestra)	2 m
σ_{ih}^2	(varianza de la muestra dentro del sólido de influencia de un sondeo, calculable por la fórmula de Matheron-Wijs)	0,2074 (1)

(1) $\sigma_{ih}^2 = 3\alpha_h \text{Ln } z/d$

$\sigma_{y_h}^2$	(varianza del sólido de influencia de una muestra dentro del sector de yacimiento evaluado (fórmula Matheron-Wijs)	0,074 (2)
\bar{h}	(potencia media del sector evaluado).	2 m
Z_h	(potencia corregida mediante la fórmula	
h	(potencia del sondeo-problema, a corregir).	-

y reemplazando, se tiene:

$$Z_h = \bar{h} \left[\frac{h}{\bar{h}} \right]^{\sigma_{y_h}^2 / \sigma_h^2} \cdot e^{-\frac{\sigma_{i_h}^2 \cdot \sigma_{y_h}^2}{\sigma_h^2}}$$

Ejemplo a)

En un sector de un depósito en el que las potencias mineralizadas no se alejan sensiblemente de un espesor promedio de 2 m, se ha registrado por mediciones indirectas (relaciones de correspondencia potencia radiactiva/potencia real) un valor muy anómalo de 7,3 m.

$$Z_h = 2 \text{ m} \left[\frac{7,3\text{m}}{2\text{m}} \right]^{0,2624} \cdot e^{-0,02721} = \underline{2,88 \text{ m}}$$

Como puede verse, la potencia original de 7,3 m se ha moderado, tendiendo a acercarse a la media reinante de 2 m.

Ejemplo b)

Una potencia exageradamente baja (0,4 m) se presenta en un ambiente en el que predominan valores próximos a 2 m.

$$Z_h = 2 \text{ m} \left[\frac{0,4\text{m}}{2\text{m}} \right]^{0,2624} \cdot e^{-0,02721} = \underline{1,35 \text{ m}}$$

Como se ve, la potencia original de 0,4 m se ha modificado tendiendo a acercarse a la media predominante de 2 m.

B) Mediante el Corrector de Matheron: se trata de una extensión conceptual del Krigismo, en el cual se reemplaza el concepto

$$(2) \quad \sigma_{y_h}^2 = 3\alpha_h \text{ Ln } D/z$$

estadístico por el de orden geométrico-geográfico, íntimamente relacionado con las dos primeras aureolas de perforaciones (o parte de ellas) que enmarcan al sondeo-problema. Su aplicación requiere la existencia de campos mineralizados de carácter isótropo o geoméricamente anisótropo y sus metodologías son esencialmente analíticas.

Tiene la ventaja sobre el Corrector de Krige de que puede ser empleado para asignar valores a sondeos faltantes. Al igual que el anterior, este Corrector ha sido siempre usado para la dimensión "tenores" pero puede ser también aplicado a la moderación y/o adaptación de potencias mineralizadas a la media de las existentes en un determinado sector del campo o bien a la asignación de una determinada potencia a un sondeo inexistente, a los efectos de completar una malla de exploración.

Ejemplo a)

Supóngase dentro de una malla completa de perforaciones, la existencia de un sondeo anómalo en el sentido de poseer una potencia exagerada (4,3 m) estimada por metodologías indirectas en un medio donde las mismas no se apartan sensiblemente de una media de 2 m; la malla se supone de 10 m de lado. Para resolver el problema se ha de recurrir a una serie de ábacos especiales de Matheron. Aplicando una de las fórmulas del mismo autor, se tiene:

$$Z_h = (1 - \lambda - \mu) h + \lambda V_h + \mu W_h \quad \text{igualdad en la}$$

que Z_h será la potencia corregida; λ y μ son parámetros extractables de ábacos especiales a los que se entra por la relación \bar{h}/a , siendo " \bar{h} " la potencia media del sector que se estudia, y " a " el lado de la malla de sondeos; " h " es la potencia del sondeo-problema que se quiere corregir; " V_h " la potencia media de la primera aureola de sondeos, ponderada por los tenores, y " W_h " la potencia media de la segunda aureola, ponderada por los tenores; en el caso, $\lambda = 0,4$ y $\mu = 0,22$.

Reemplazando, se tiene:

$$\begin{aligned} Z_h &= (1 - 0,4 - 0,22) 4,3\text{m} + 0,4 \times 2,06 + 0,22 \times 1,42 = \\ &= \underline{2,77\text{m}} \end{aligned}$$

Como puede verse, el valor anómalo de 4,3 m se ha reducido tendiendo a acercarse a la potencia media de 2 m.

Ejemplo b)

Una potencia exageradamente baja (0,4 m) registrada en el mismo ambiente anterior en el que predominan potencias próxi

mas a los 2 m. Siendo siempre " \bar{h} " = 2 m, y "a" = 10 m y manteniéndose el mismo esquema de las dos aureolas de perforaciones completas, los valores de λ y μ tampoco varían.

$$Z_h = (1 - 0,4 - 0,22) 0,4m + 0,4 \times 2,06 + 0,22 \times 1,42 = \\ = \underline{1,52m}$$

Puede verse que en este caso, la potencia corregida se ha incrementado.

Ejemplo c)

El mismo cuadro anterior pero faltando el sondeo-problema. El parámetro " μ " se obtiene de un ábaco, siempre partiendo de h/a ; en este caso, $\mu' = 0,35$.

Aplicando la fórmula correspondiente:

$$Z_h = (1 - \mu') V_h + \mu' W_h$$

y reemplazando,

$$Z_h = (1 - 0,35) 2,06 + 0,35 \times 1,42 = \underline{1,84m}$$

Puede observarse que se ha asignado al sondeo inexistente un espesor mineralizado no desacorde con la potencia media del sector del depósito que enmarca a aquél.

Repitiendo conceptos expuestos en un trabajo anterior sobre la aplicación de los Correctores a los tenores (Lucero Michaut, 1978) se agregará que "el Corrector de Krige tiene la ventaja de la confiabilidad cualitativa derivada del hecho de que sus resultados descansan en propiedades geoestadísticas intrínsecas de un determinado depósito (o parte de él) tomado en su totalidad, y de que una vez en posesión de los parámetros básicos que lo definen, la resolución de cada caso planteado es sumamente rápida; como desventaja con respecto a la otra metodología puede señalarse que no toma en cuenta la incidencia particular de los valores de los sondeos que circundan al punto-problema.

El Corrector de Matheron tiene la ventaja de que los resultados con él logrados se basan en las relaciones inmediatas existentes con el ambiente local del sondeo dudoso, aparte de su gran versatilidad que le permite tratar distintamente los diferentes casos, asignar valores a sondeos faltantes en una malla y que lo torna permeable a otros usos como el aquí postulado para la corrección de potencias".

Ambos Correctores pueden ser también empleados para corregir acumulaciones potencia-tenor.

V.2. Aplicaciones prácticas de la "Teoría Transitiva" al problema de la estimación geométrica bi y tridimensional de campos mineralizados

Básicamente se trata del problema de asignar a un área o a un volúmen (o tonelaje de mineral) un determinado rango de confiabilidad numéricamente expresable como porcentaje.

De acuerdo a Michel David (International Symposium APCOM, 1970) hay un principio esencial de la geoestadística que establece que la varianza de la estimación global de una superficie puede lograrse a partir de la combinación de una concepción lineal y otra bidimensional; se trata de la realización de dos extensiones (o saltos extrapolativos), uno de ellos ligado a la asignación del tenor de un punto de muestreo a una línea, y el otro a la del de una línea al rectángulo que la contiene.

V.2.1. Aplicaciones de la Teoría Transitiva al problema geométrico bidimensional

Una fórmula de G. Matheron, proporciona la respuesta (1).

Ejemplo a)

Un determinado sector del yacimiento "Rodolfo" (Prov. de Córdoba) de características netamente estratiformes (ver Fig. 9) posee una superficie de 92800 m² y ha sido explorado mediante 20 sondeos según una malla de 100 m de Norte a Sur por 38 m de Este a Oeste; dado que el estratiforme de referencia buza unos 35° hacia el Este, la real dimensión de la malla en ese sentido es de 46,4 m. El problema radica en la determinación del porcentaje de error -en más o en menos- a que quedará afectada la superficie del campo mineralizado.

Aplicando el formalismo de Matheron, se tiene:

$$\sigma_{S/S}^2 = 1/n^2 \left[N_{1/6} + 0,0609 \cdot N_2^2/N_1 \right],$$

debiendo verificarse que $N_2 \geq N_1$, en el mismo, $\sigma_{S/S}^2$ es la varianza relativa de la superficie mineralizada,

S, es la superficie estimada = 92800 m²

(1) Matheron G., 1969.

n, es el número de sondeos, en este caso = 20

N₁, es la "variación perimetral" o longitud total del contorno -por segmentos discontinuos- del campo mineralizado, en este caso en forma paralela a la dirección Este-Oeste, dividida por la magnitud métrica del lado de la malla de exploración

$$(a_1 = 46,4m; N_1 = \frac{464m}{46,4m} = 10)$$

N₂, es la "variación perimetral" o longitud total del contorno -por segmentos- del campo, en el caso, en forma paralela a la dirección Norte-Sur, dividida por la dimensión de la malla en esa dirección

$$(a_2 = 100m; N_2 = \frac{1400m}{100m} = 14),$$

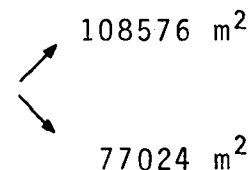
y 0,069 es una constante.

Reemplazando en la fórmula, se tiene:

$$\sigma_{S/S}^2 = 0,025 [10/6 + 0,069 \cdot 14^2/10] = 7,15 \cdot 10^{-3}$$

$$2\sigma_{S/S} = (7,15 \cdot 10^{-3})^{0,5}$$

$$2\sigma_{S/S} = 0,169 \approx \underline{17 \%}$$

Es decir, $S = 92800m^2 \pm 17 \%$  108576 m² al nivel de certidumbre del 95 %
77024 m²

Ejemplo b)

El total de la superficie del yacimiento "schlagintweit" (Prov. de Córdoba) (ver Fig. 10) -considerado a los solos efectos de esta aplicación, como estratiforme- posee una superficie de 93400 m² y ha sido explorado mediante 229 sondeos según una malla de 20 x 20 m; se desea resolver el problema geométrico bidimensional de la determinación del error global al que quedará afectada su superficie.

- siendo N₁ la "variación perimetral" según la dirección NE-SO, dividida por:


$$"a_1" = "a_2" = 20 m, N_1 = \frac{639,5m}{20m} = 31,975m$$

- y N_2 la "variación perimetral" según la dirección NO-SE, dividida por:

$$"a_2" = "a_1" = 20m, N_2 = \frac{897,5m}{20m} = 44,875m$$

$$\sigma_{S/S}^2 = 1/229^2 \left[31,975/6 + 0,0609 \cdot \frac{44,875^2}{31,975} \right] = 1,747 \cdot 10^{-4}$$

$$2\sigma_{S/S} = \sqrt{1,747 \cdot 10^{-4}} = 0,02643 \approx \underline{2.6 \%}$$

Vale decir, $93.400m^2 \pm 2.6 \%$  $95828 m^2$ al nivel de certidumbre de 2σ
 $90972 m^2$

lo que indica la obtención de una excelente precisión.

V.2.2. Aplicaciones de la Teoría Transitiva al problema geométrico tridimensional

Ejemplo a)

Considerando al yacimiento "Rodolfo" (Prov. de Córdoba) como un depósito de tipo "amas" al sólo efecto de aplicar estas metodologías, se dispondrán los cálculos conforme a los lineamientos siguientes de acuerdo a los desarrollos de la formulística de Matheron (en Carlier A., 1964) para la obtención de la "Varianza de Estimación volumétrica" (y60 masa de mineral) (Lucero M., 1978,a).

a) Cálculo de σ_p^2 (varianza de perfiles)

$$-- \sigma_p^2 = 1/n^3 (0,175 \cdot \ln.n + 0,222) \quad 1/N - 1$$

- Sea σ_p^2 la primera extensión conceptual, "n", el número promedio de sondeos por perfil, y "N", el número de perfiles en la dirección que debe coincidir con la de menores contrastes en las potencias mineralizadas (en el caso, la N-S), circunstancia comprobable mediante la confección de un variograma log-aritmético; 0,175 y 0,222 son constantes.

$$\sigma_p^2 = 1/5^3 (0,175 \times 1,6094 + 0,222) \quad 1/3$$

$$= 0,008 \times 0,5036 \times 0,33 = 1,3 \cdot 10^{-3}$$

b) Cálculo de σ_{b1}^2 o varianza de bloques verticales (2a. extrapola

ción); "a" = lado de la malla de exploración, y siendo "a₁" = 46,4 m y "a₂" = 100 m,

$$\text{se tiene que "a"} = \frac{46,4\text{m} + 100}{2} = 73,2 \text{ m}$$

"A" es la "hemivariación perimetral" del campo, que por coincidir con la dirección de menores contrastes entre potencias, debe ir en el numerador de la fórmula (A = 700 m);

S², es el cuadrado de la superficie de la proyección del sólido mineralizado sobre un plano horizontal,

y "B" es la "hemivariación perimetral" del cuerpo en la dirección ortogonal a la primera (B = 232 m).

$$\begin{aligned} \sigma_{b1}^2 &= \frac{0,4431}{6} \times \frac{a^3 \times A^2}{S^2 \times B} = 0,07385 \times 0,961934 \\ &= 7,1 \cdot 10^{-3} \quad (1) \end{aligned}$$

$$c) \quad \sigma_E^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{b1}^2 = 13 \cdot 10^{-4} + 71 \cdot 10^{-4} = 84 \cdot 10^{-4}$$

$$d) \quad 2\sigma_E = (84 \cdot 10^{-4})^{0,5} = 0,183 \approx \underline{18 \%}$$

$$\text{Luego, } 92800 \text{ m}^2 \times 2 \times \delta \quad (2)$$

$$= 371200 \text{ t mineral} \pm 18 \% \begin{cases} \nearrow 438016 \text{ t} \\ \searrow 304384 \text{ t,} \end{cases}$$

en una primera aproximación; aplicando con mayor severidad estos criterios, se tendría empleando el carácter exponencial de los porcentajes de error calculados, y redondeando:

$$371200 \begin{cases} \nearrow \cdot e^{+0,18} = 444400 \text{ t} \\ \searrow \cdot e^{-0,18} = 310000 \text{ t} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{al nivel de cer-} \\ \text{tidumbre de } 2\sigma \end{array}$$

(1) Matheron G. en Carlier A., 1964.

(2) δ = densidad, que en este caso es igual a ≈ 2

Ejemplo b) El yacimiento "Schlagintweit" (Prov. de Córdoba) es de tipo "amas" por lo que admite naturalmente, un tratamiento de esta índole; en este caso, $n = 229$ y $N = 14$, $A = 897,5m$, $B = 639,5m$ y $S = 93400m^2$.

1) aplicando la anterior fórmula:

$$\sigma_p^2 = 1/n^3(0,175 \cdot \text{Ln. } n + 0,222) 1/N-1$$

se tiene:

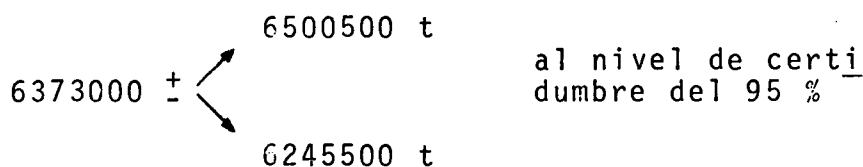
$$\sigma_p^2 = 2,28 \cdot 10^{-4} \times 0,711125 \times 0,07692 = 0,125 \cdot 10^{-4}$$

$$2) \text{ y } \sigma_{b1}^2 = \frac{0,4431}{6} \times \frac{a^3 \times A^2}{S^2 \times B} = 0,853 \cdot 10^{-4}$$

$$3) \sigma_E^2 = 0,125 \cdot 10^{-4} + 0,853 \cdot 10^{-4} \approx 1 \cdot 10^{-4}$$

$$4) 2\sigma_E = (1 \cdot 10^{-4})^{0,5} = \underline{2 \%}$$

Luego, las 6373000 t de mineral existentes podrían fluctuar de la siguiente manera:



Cabe señalar la similitud de resultados obtenidos para un mismo yacimiento mediante los dos formulismos que cuantifican el error para superficies y para volúmenes (o masas).

Finalmente se repetirán algunos de los conceptos expuestos en el Curso anterior (Lucero Michaut, 1978) relativos a los alcances y limitaciones de la Geoestadística dentro del campo geológico-minero: "buena parte del grado de utilidad confiable descansa en el hecho de que la responsabilidad del tratamiento se encuentre en manos de profesionales poseedores de un robusto trasfondo de experiencia en geología regional y yacimientológica; en efecto, toda una serie de laboriosas especulaciones metodológicas de base matemática pueden llegar a caer en el vacío por falta de continuidad de las estructuras de soporte, no acertada ni debidamente detectadas por causa de observaciones geológicas defectuosas o incompletas. Siempre sobre estas bases, puede decirse que las disciplinas geoestadísticas poseen la ventaja de la especulación adimensionada que permite extrapolaciones muy liberales en cuanto a escalas, y la desventaja de que, operando a idénticas escalas, siempre serán más objetivos los resultados logrados mediante la observación geológica directa".

VI. BIBLIOGRAFIA

- ALFARO, Marcos A., 1977. "Curso Práctico de Geoestadística". E.T. S. de Ingenieros de Madrid - Centro de Cálculo. España.
- CARLIER, A., 1964. "Contribution aux méthodes d'estimation des gisements d'uranium". Rapport C.E.A. 2332. Francia.
- DAVID, Michel, 1970. "Geostatistical ore estimation. A step by step case study". International Symposium Decision-making in the Mineral Industry. Special Vol.N° 12. Canadá.
- DAVID, Michel, 1970. "The Geostatistical Estimation of Porphyry tipe deposits and scale factor problems". Matematické Metody v Geologii - International Symposium". "Hornická Příbram ve Věde a Technice-Scientiae Rerum Montanarum". Checoslovakia - Octubre 1970.
- DAVID, Michel; DAGBERT, M. and BALISLE, J.M., 1977. "The Practice of Porphyry Copper deposits estimation for grade and ore-waste tonnages demonstrated by several studies". 15th A.P.C.O.M. Symposium. Brisbane - Australia.
- DAVID, Michel and DAVIS, Michael W.D., 1978. "Automatic Kriging and contouring in the presence of trends (Universal Kriging made simple)". Journal of Canadian Petroleum Technology Vol. 17 N° 1, January-March 1978. Canadá.
- DAVID, Michel, 1979. Comunicaciones epistolares.
- JOURNEL, A., 1971. "Géostatistique et Applications Minières". Centre de Morphologie Mathématique. Fontainebleau. France.
- KRIGE, Davie, 1955. "Analyse statistique des principaux risques en relation avec l'investissement dans les nouvelles mines d'or d'Afrique du Sud. Tegnikon. (Traducción al francés de Duval R., Levy R. y Matheron G.). París - Francia.
- KRIGE, Davie, 1976. "A review of the development of geostatistics in South Africa. Advanced Geostatistics in the Mining Industry". Reidel Publ.Co.South Africa.
- KRIGE, Davie, 1979. Comunicaciones epistolares.
- LUCERO MICHAUT, H.N., 1970. "Application of Geostatistical Criteria to Uranium Ore Reserve Estimation". International Symposium on Decision-making in the Mineral Industry. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Special Volume N° 12. Canadá.

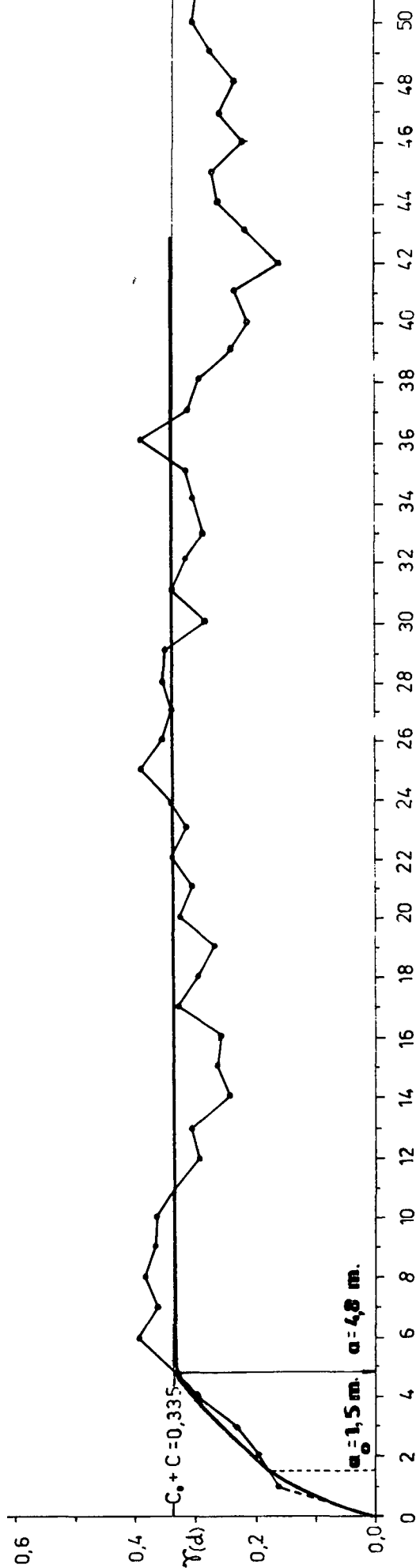
- LUCERO MICAHUT, H.N., 1973. "Función Geoestadística del Variograma y su empleo en la obtención del Coeficiente de Dispersión Absoluto Alfa". Revista de la Asociación Geológica Argentina. Tomo XXVIII, N° 1. Bs.Aires. Argentina.
- LUCERO MICHAUT, H.N., 1973. "A step towards the effective determination of the dimensions of both sides of a borehole grid system and its best orientation by means of the coefficient of absolute dispersion in anisotropic mineralized fields". Matematické Metody v Geologii. International Symposium "Hornická Příbram ve Vědě a Technice". Scientiae Rerum Montanarum. Checoslovakia.
- LUCERO MICHAUT, H.N., 1978a. "Informe final sobre el cálculo de reservas del yacimiento "Schlagintweit" (Córdoba) en función de la exploración -Agosto 1977/Junio 1978- realizada mediante sondeos radievaluados". Dpto. Evaluación CNEA. Bs.Aires - Argentina.
- LUCERO MICHAUT, H.N., 1978. "Geoestadística y Estimación de Reservas de Uranio - Las Metodologías Geoestadísticas como Instrumentos de Investigación". Curso Latinoamericano de Capacitación para la Prospección y Exploración de Yacimientos Uraníferos. CIEN-CNEA y OEA. Buenos Aires y Mendoza (Rep.Argentina), Octubre de 1978.
- LUCERO MICAHUT, H.N., 1979. "Estadística y Geoestadística Krigismo y Utilización de las Funciones Variográficas y Hemivariográficas en la Investigación Estructural y en la Delimitación de Zonas de Influencia en la Yacimientología del Uranio". Trabajo destinado a ser presentado en el "Simposio Internacional sobre Técnicas de Evaluación y Minería del Uranio". OIEA. Organismo Internacional de Energía Atómica - Viena, que se realizará en Buenos Aires en Octubre de 1979.
- MATHERON, Georges, 1969. "Cours de Géostatistique" Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. Fascicule 1. Francia.
- MATHERON, G., 1969. "Cours de Géostatistique". Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. Fascicule 2. Francia.
- NEMEC, Vaclav, 1970. "The law of structural patterns; its applications with special regard to mathematical geology". Geindustria-Praha Checoslovakia and Kansas Geological Survey. U.S.A.
- NEMEC, Vaclav, 1973. "Probleme der Lagerstättenmodellierung" Z. für geologische Wissenschaft. Berlin 1. Deutschland.
- NEMEC, Vaclav, 1978. Comunicaciones epistolares.

SERRA, Jean, 1968. "Un critere nouveau de decouverte de structures. Le Variogramme". Sciences de la Terre. Nancy - Francia.

SERRA, Jean, 1968. "Les Structures Gigognes. Morphologie Mathématique et Interpretation Metallogénique" Mineral Deposits. (Berlin).

YACIMIENTO RODOLFO ~ PROV. DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

Hemivariograma de potencias mineralizadas



Dirección	Parámetros Escalares	Parámetros Vectoriales	Hemiv. Experim.	Modelo Teórico
N ~ S	$C_0 = 0,00$, $C = 0,335$	$d = 1 \text{ m}$, $a_0 = 1,5 \text{ m}$, $a = 4,8 \text{ m}$	—	—

fig. n° 2 a)

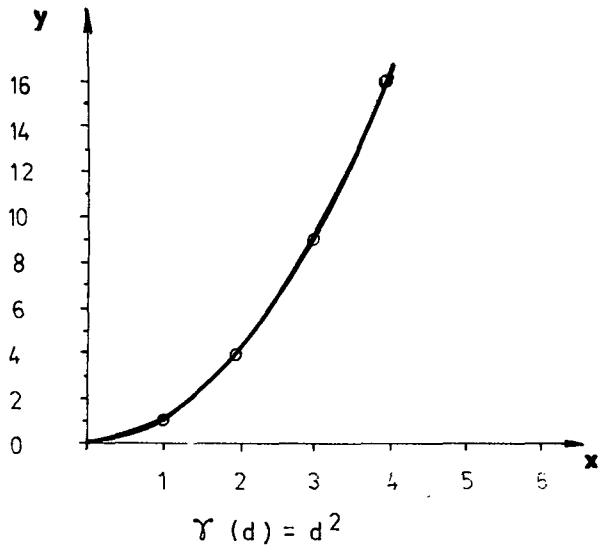


fig. n° 2 b)

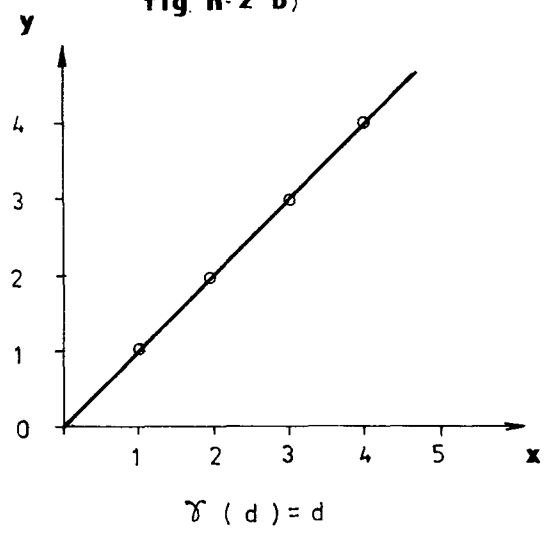


fig. n° 2 c)

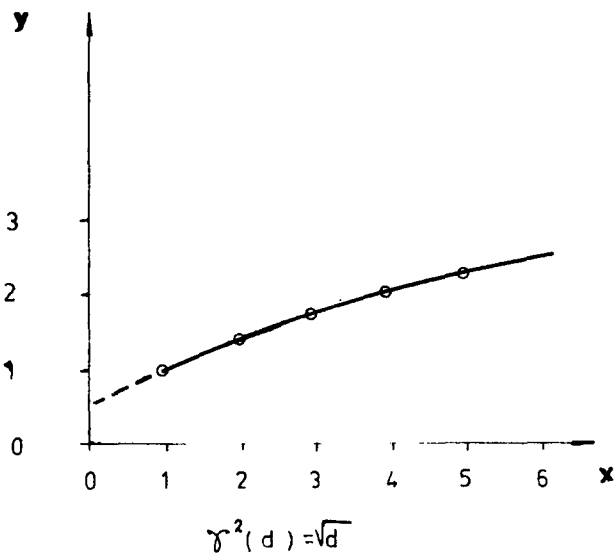
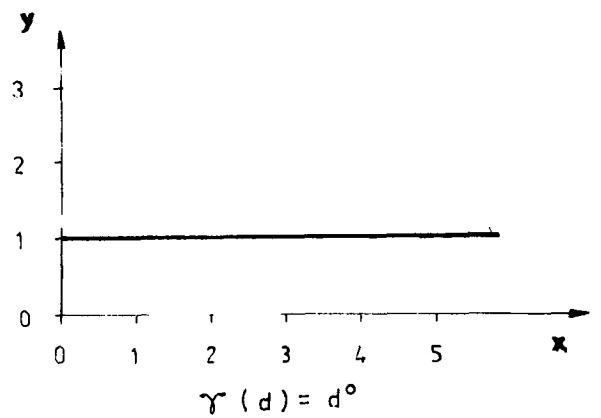


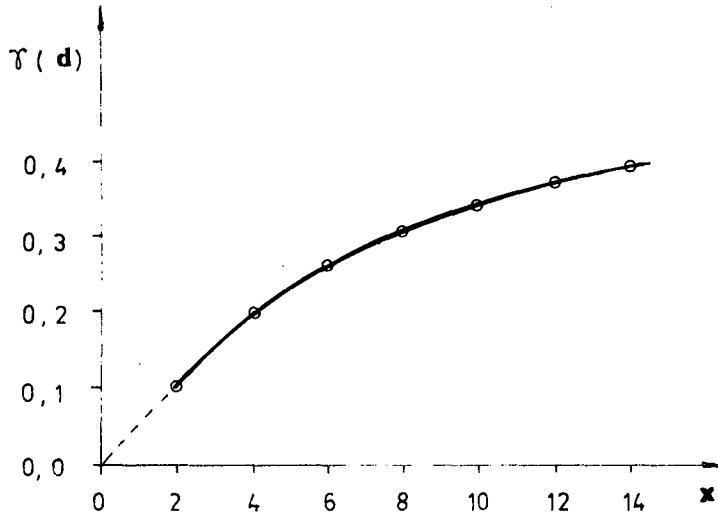
fig. n° 2 d)



A) MODELOS HEMIVARIOGRAMICOS NO ACOTADOS

Esquema WIJSIANO

fig. 3 a)



$$\gamma(d) \propto \ln d$$

supuesto $\alpha = 5\%$

$$d = 2 \rightarrow \gamma(d)_2 = 0,15 \times 0,693 = 0,104$$

$$d = 4 \rightarrow \gamma(d)_4 = 0,15 \times 1,386 = 0,208$$

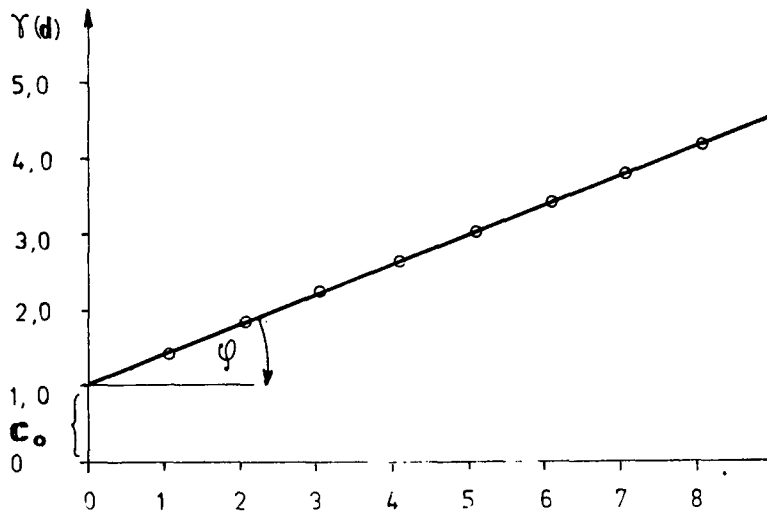
$$d = 6 \rightarrow \gamma(d)_6 = 0,15 \times 1,791 = 0,268$$

$$d = 8 \rightarrow \gamma(d)_8 = 0,15 \times 2,079 = 0,312$$

$$d = 14 \rightarrow \gamma(d)_{14} = 0,15 \times 2,639 = 0,396$$

Esquema LINEAL

fig. 3 b)



$$\gamma(d) = C_0 + fg\alpha \cdot d$$

supuesto $\varphi = 21^\circ 48'$

$$d = 1 \rightarrow \gamma(d)_2 = 1 \times 0,4 + 1 = 1,4$$

$$d = 2 \rightarrow \gamma(d)_2 = 2 \times 0,4 + 1 = 1,8$$

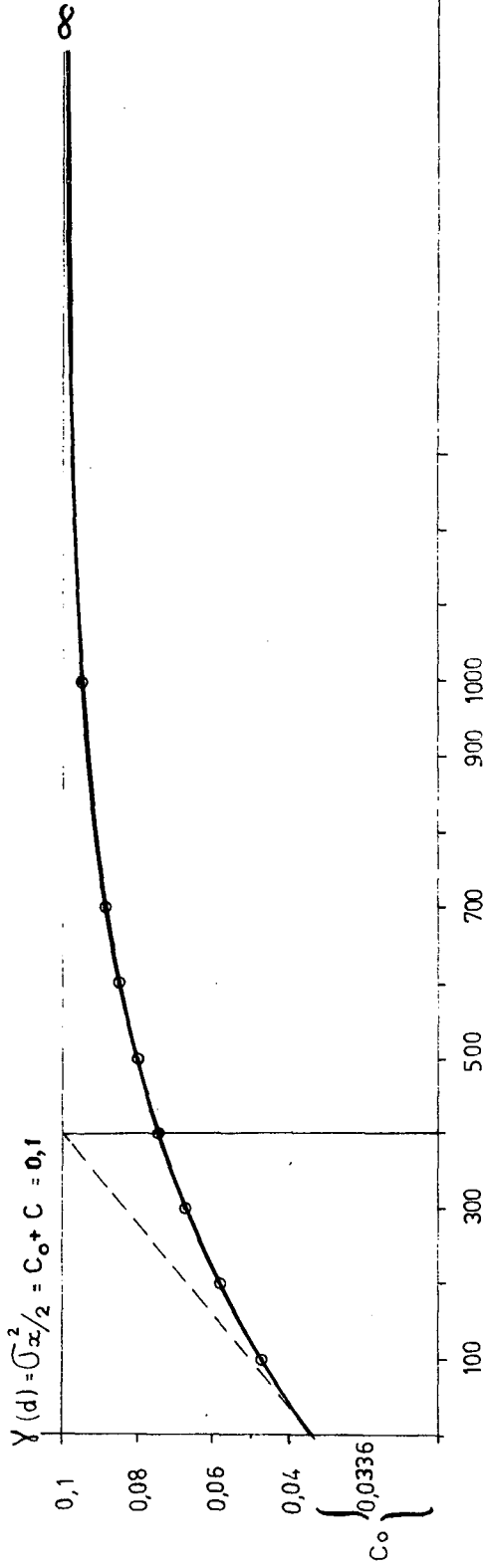
$$d = 3 \rightarrow \gamma(d)_3 = 3 \times 0,4 + 1 = 2,2$$

$$d = 4 \rightarrow \gamma(d)_3 = 4 \times 0,4 + 1 = 2,6$$

$$d = 8 \rightarrow \gamma(d)_8 = 8 \times 0,4 + 1 = 4,2$$

B) MODELOS VARIOGRAMICOS ACOTADOS

Esquema FORMERYANO o EXPONENCIAL (distribución cuprífera)



$$\gamma(d) = C_0 + C [1 - e^{-d/a}]$$

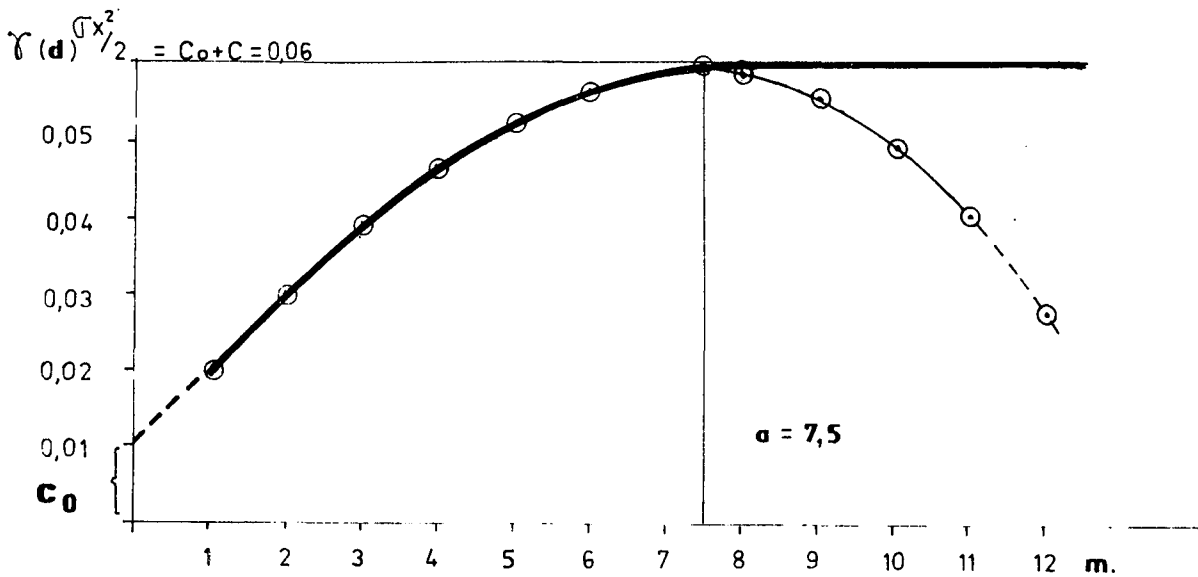
$$\text{y para } d \geq a : \gamma(d) = C_0 + C [1 - 1/e]$$

suponiendo : a = 400 m

d = 100	$\gamma(d)_{100} = 0,0336 + 0,0664 [1 - e^{-100/400}]$	= 0,0843
d = 200	$\gamma(d)_{200} = 0,0336 + 0,0664 [1 - e^{-200/400}]$	= 0,0597
d = 300	$\gamma(d)_{300} = 0,0336 + 0,0664 [1 - e^{-300/400}]$	= 0,0686
d = 400	$\gamma(d)_{400} = 0,0336 + 0,0664 [1 - 1/e]$	= 0,0755 (d ≥ a)
d = 500		= 0,081
d = 600		= 0,085
d = 700		= 0,088
<hr/>		
d = 1000		= 0,0945
d = 2000		= 0,0995

**B) MODELOS VARIOGRAMICOS ACOTADOS
ESQUEMA ESFERICO o MATHERONIANO**

fig. 3 d)



$$\gamma(d) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{d}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a} \right)^3 \right]$$

y para:

$$d \geq a; \gamma(d) = C_0 + C$$

suponiendo:

$$a = 7,5 \text{ m.}$$

$$d = 1; \gamma(d_1) = 0,01 + 0,05 \left[\frac{3}{2} \frac{1}{7,5} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{7,5} \right)^3 \right] = 0,0199$$

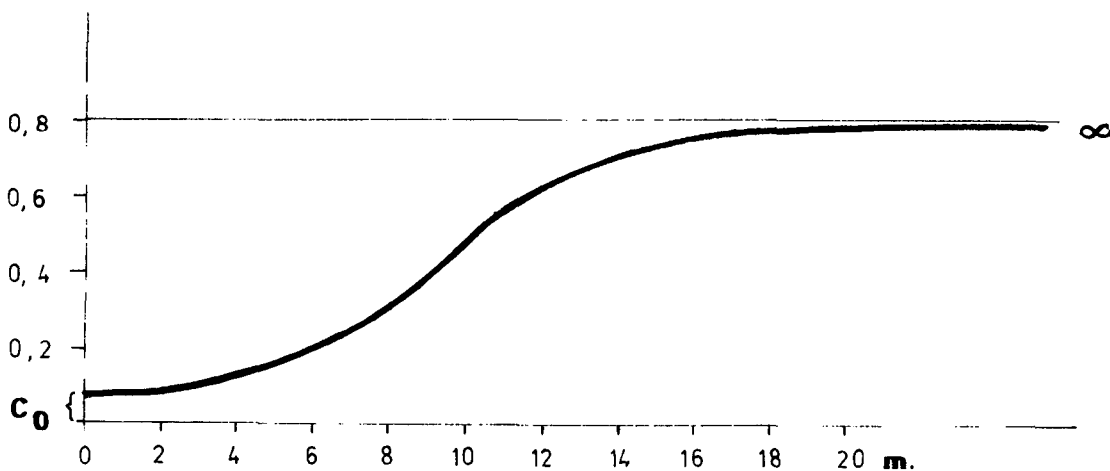
$$d = 2; \gamma(d_2) = 0,01 + 0,05 \left[\frac{3}{2} \frac{2}{7,5} - \frac{1}{2} \left(\frac{2}{7,5} \right)^3 \right] = 0,0295$$

$$d = 3; \gamma(d_3) = 0,01 + 0,05 \left[\frac{3}{2} \frac{3}{7,5} - \frac{1}{2} \left(\frac{3}{7,5} \right)^3 \right] = 0,0384$$

$$d = 7,5; \gamma(d_{7,5}) = 0,01 + 0,05 = 0,06$$

ESQUEMA GAUSSIANO

fig. 3 e)

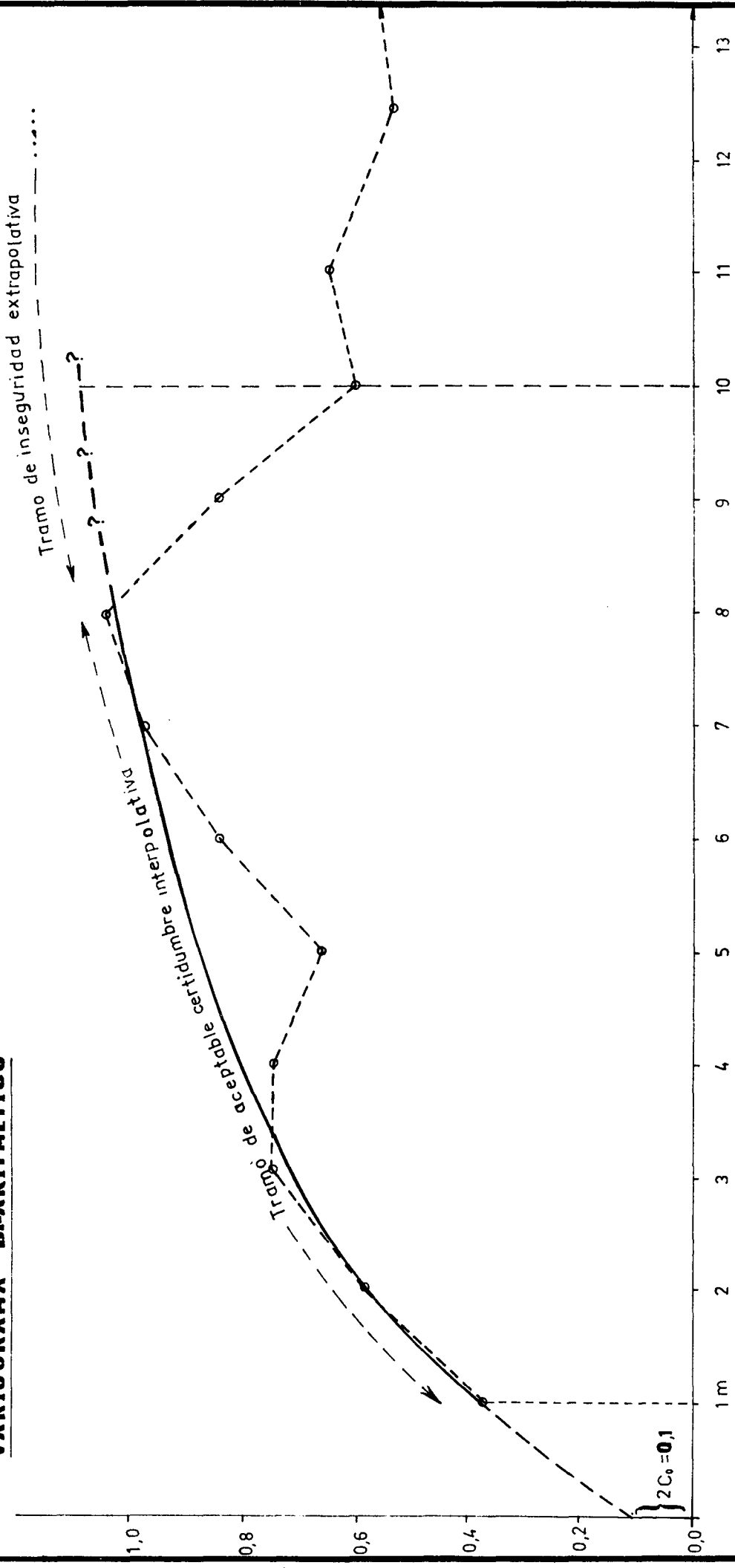


$$\gamma(d) = C_0 + C \left[1 - e^{-\left(\frac{d}{a} \right)^2} \right]$$

fig. 4 a)

YACIMIENTO RODOLFO ~ PROVINCIA DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

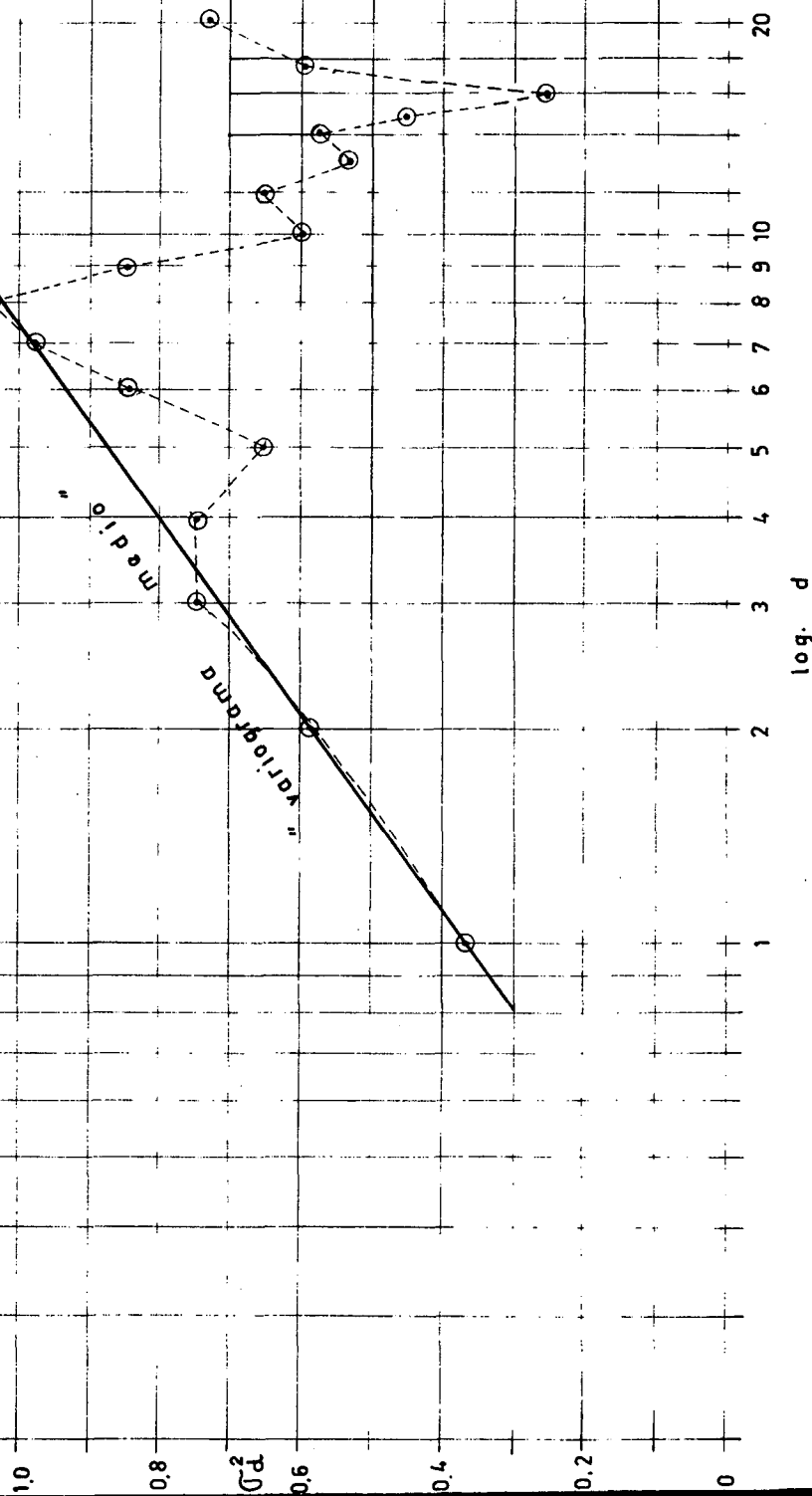
VARIOGRAMA BI-ARITMETICO



$3 \alpha = 0,1566$

YACIMIENTO RODOLFO ~ CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

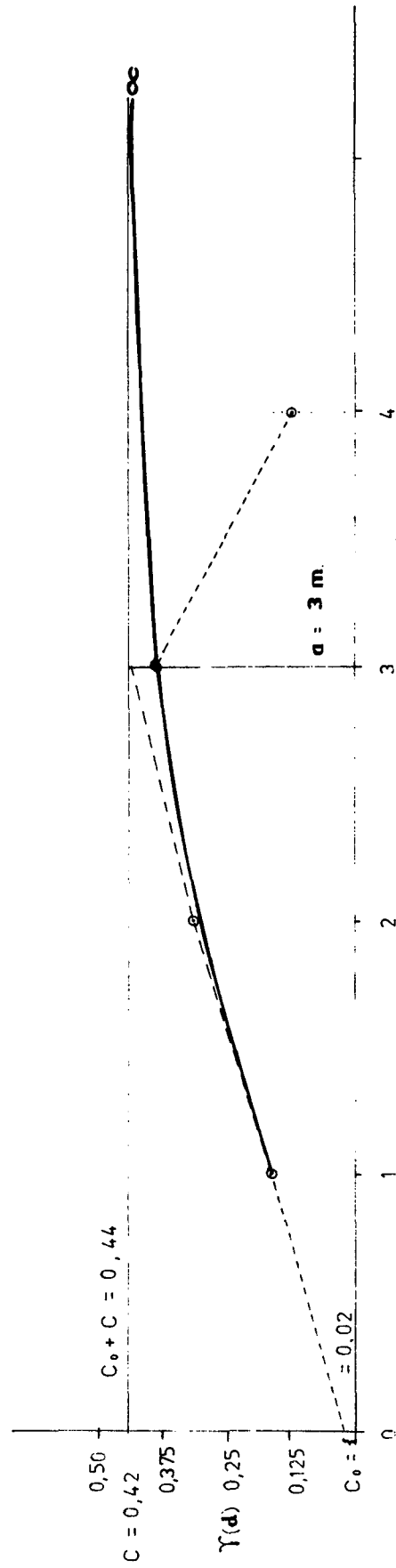
VARIOGRAMA LOG-ARITMETICO



YACIMIENTO EL INFIERNO ~ LA RIOJA ~ REPUBLICA ARGENTINA

fig. 5.

Hemivariograma vertical, de tenores (x)

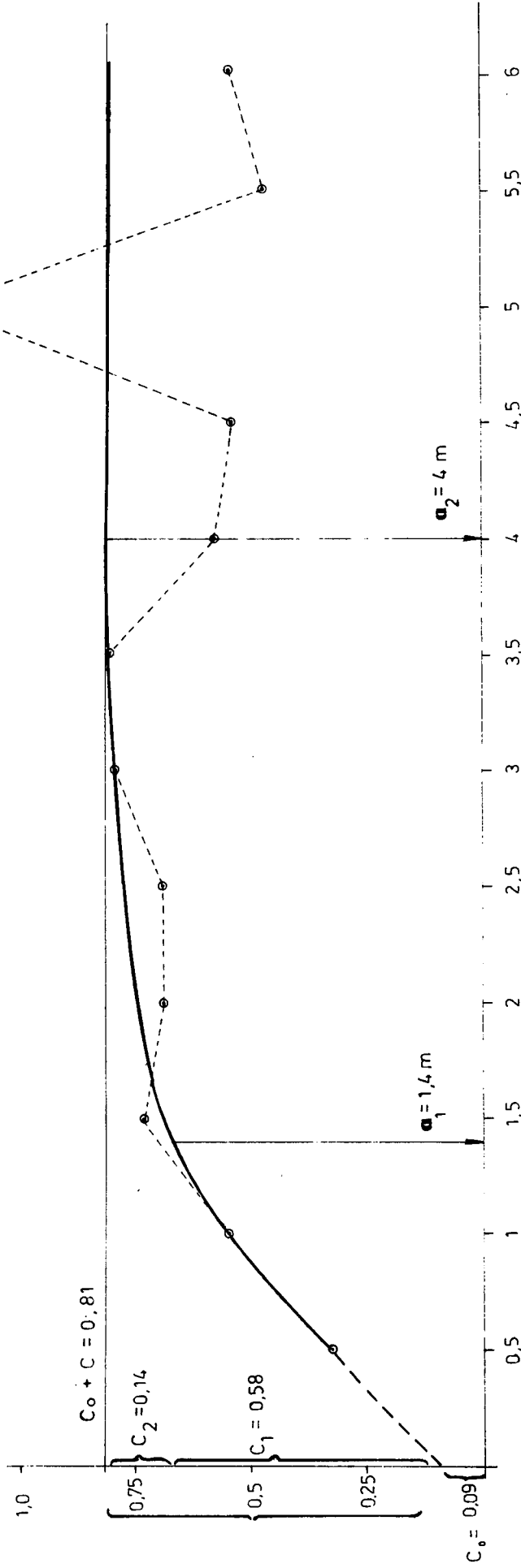


$$C_0 + C = \sqrt{x^2}/2 = 0,44$$

$$C_0 = 0,02 \text{ , } C = 0,42 \text{ , } \tau = 3 \text{ m}$$

CUERPO SUPERIOR

Hemivariograma vertical de tanores (x)



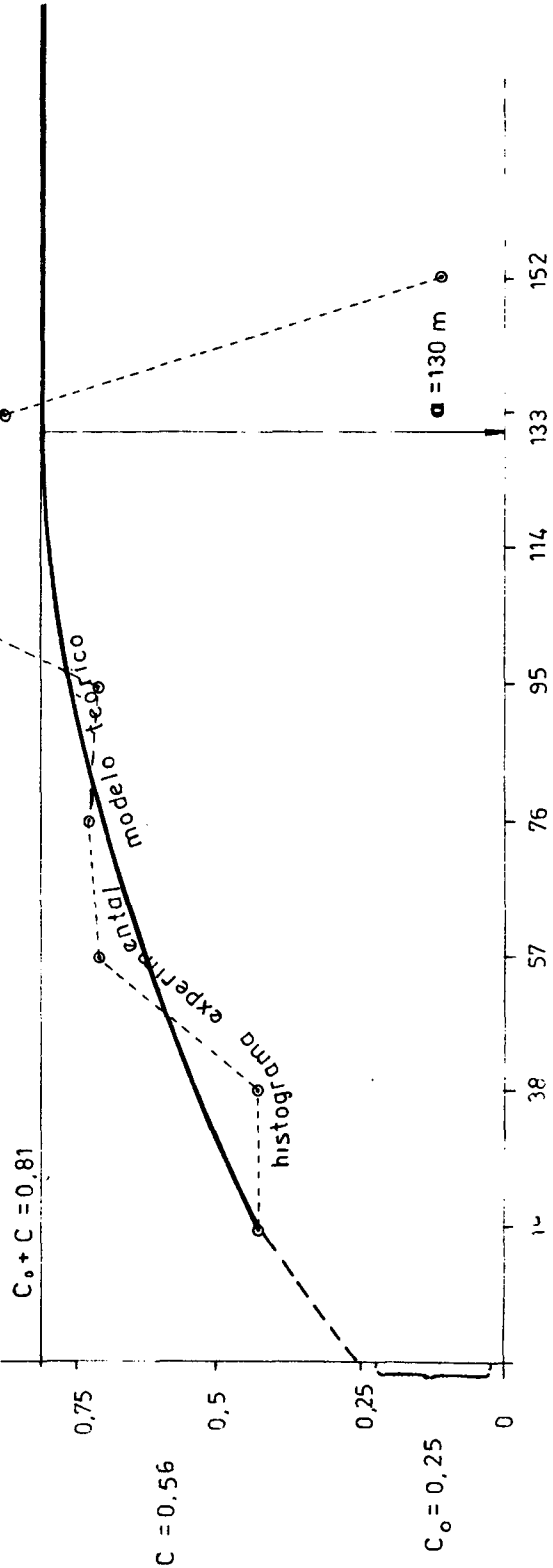
$$C_0 + C_1 + C_2 = \frac{\sigma^2}{2} = 0.81$$

$$C_0 = 0.09, C_1 = 0.58, C_2 = 0.14 \quad \text{---} \quad a = 1.4, a = 4 \text{ m}$$

YACIMIENTO LA ESTELA ~ PROV. DE SAN LUIS ~ RCP ARGENTINA
CUERPO SUPERIOR

fig. 6 b)

Hemivariograma horizontal de tenores (x) (dirección Oeste-Este)



$$C_0 + C = \sigma^2 x / 2 = 0,81$$

$$C_0 = 0,25, C = 0,56, a = 130 \text{ m}$$

YACIMIENTO LA ESTELA ~ PROV. DE SAN LUIS ~ REP. ARGENTINA

Cuerpo Superior

fig. 6 c)

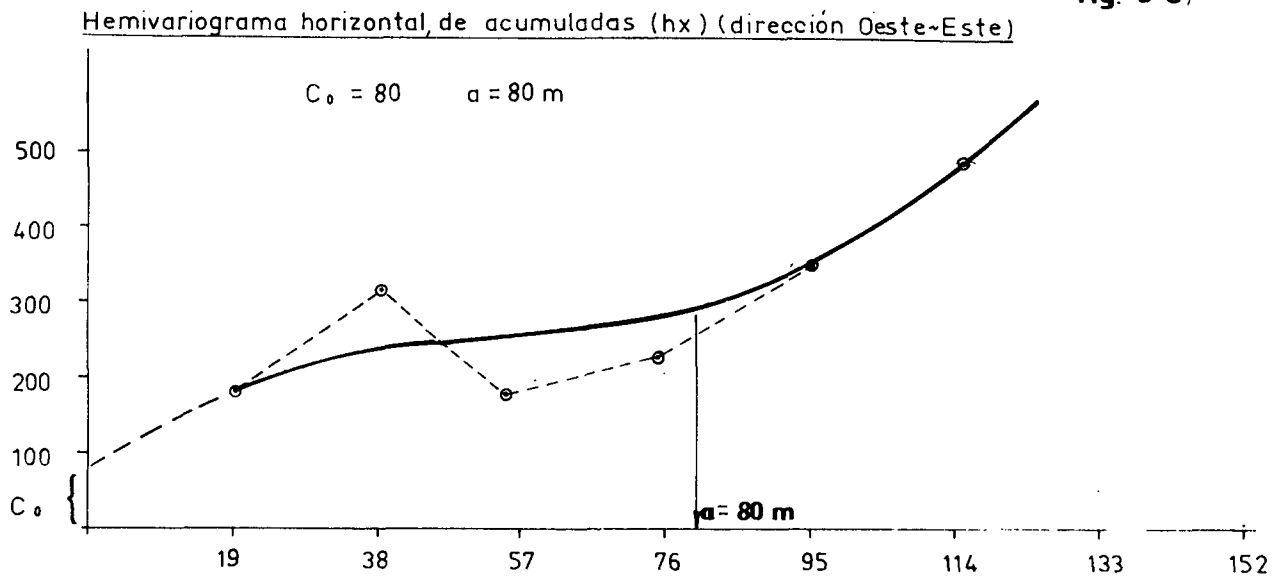


fig. 6 d)

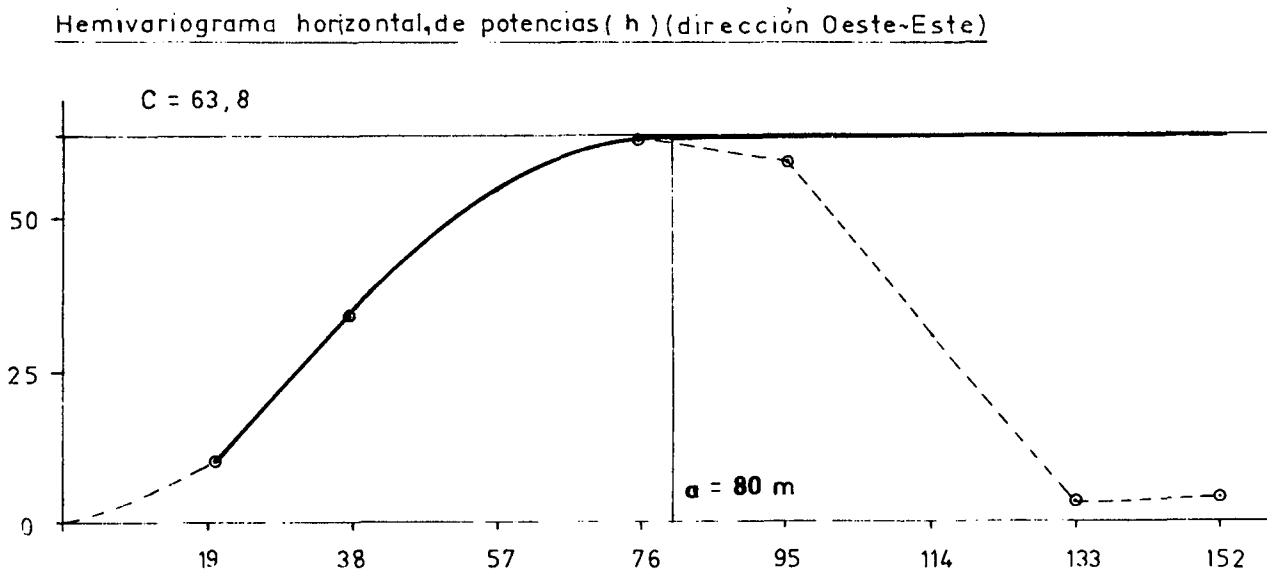


fig. 7

YACIMIENTO SCHLAGINTWEIT ~ PROV. DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

Hemivariograma vertical, de tenores (x)

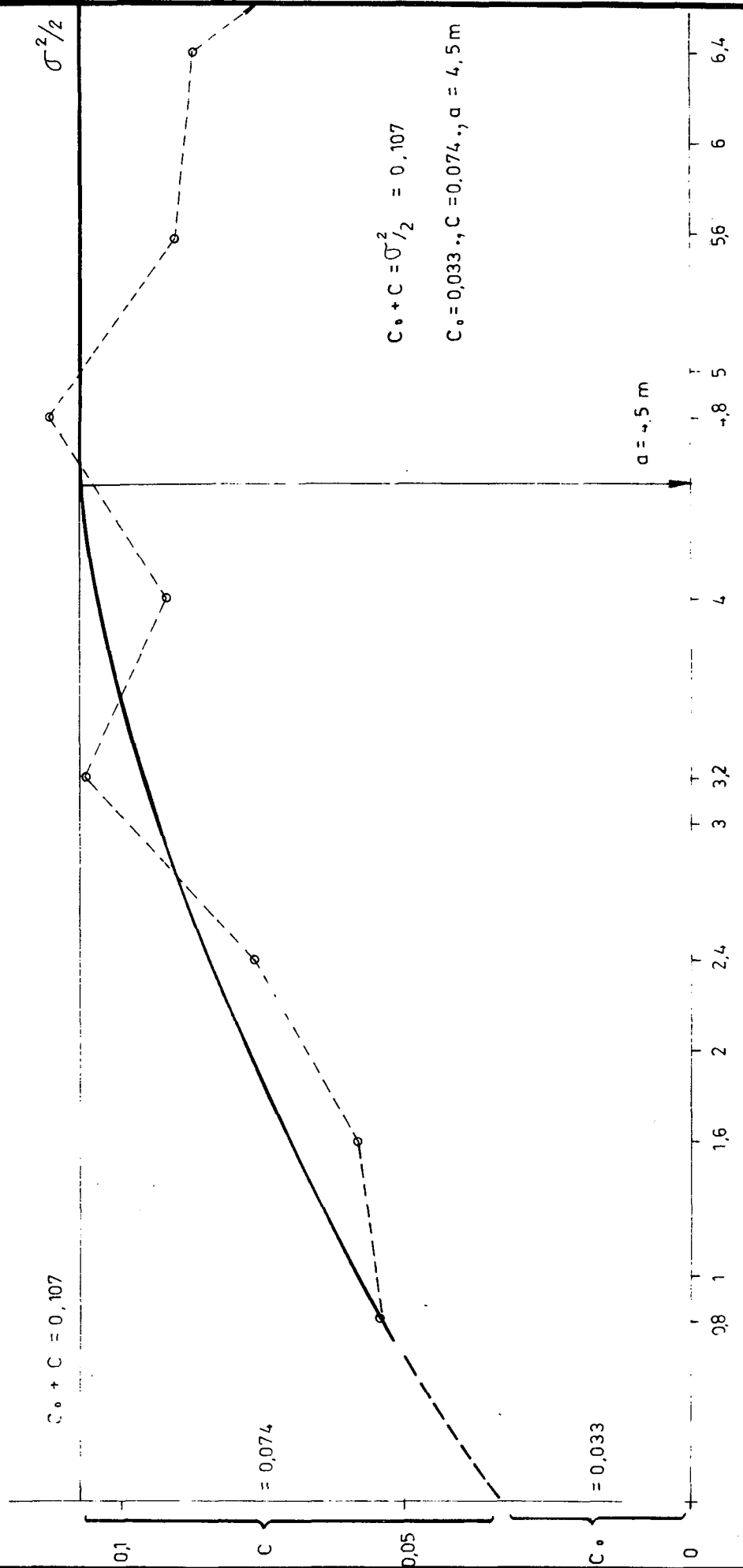
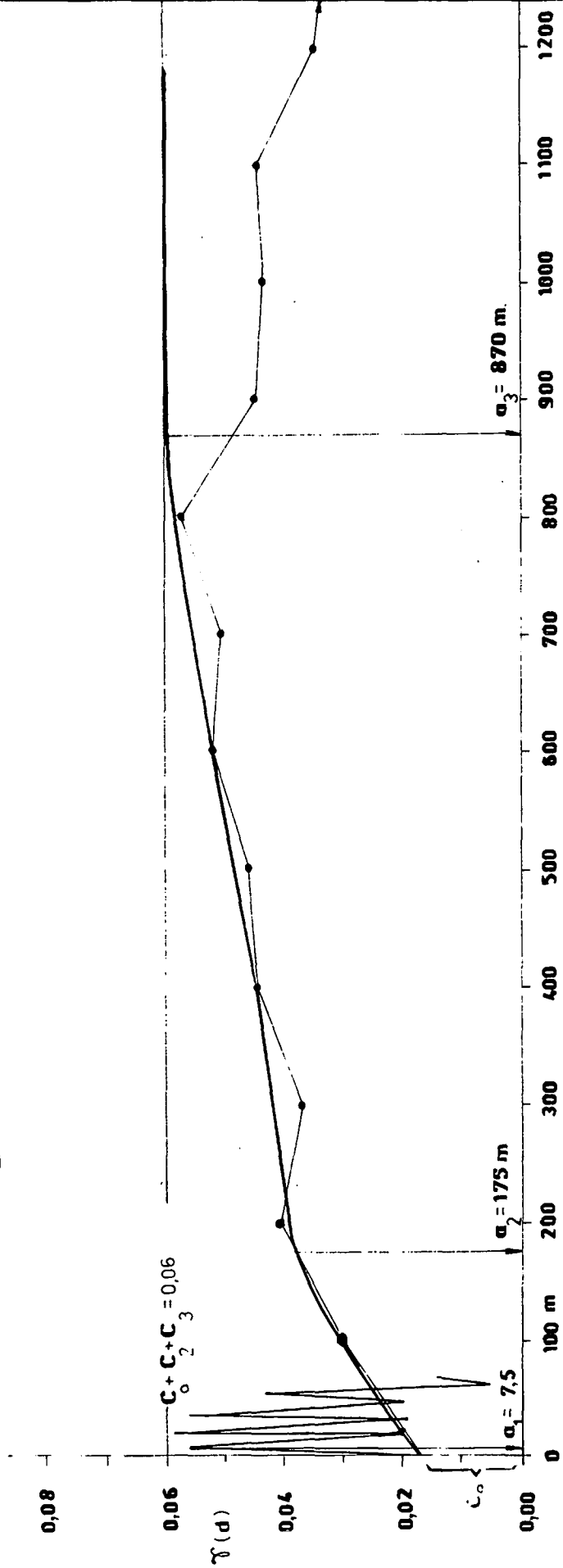


fig. 8

YACIMIENTO RODOLFO ~ PROV. DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

Dirección	Parámetros Escalares	Parámetros Vectoriales	Hemiv Experimental	Modelo Técnico
N ~ S	$C_0 = 0,016, C_2 = 0,022, C_3 = 0,022$	$d = 100 \text{ m}, a_2 = 175 \text{ m}, a_3 = 870 \text{ m}$	(Tenores)	
M ~ S	$C_0 = 0,01 \quad C_1 = 0,05$	$d = 1 \text{ m}, a_1 = 7,5 \text{ m}$		



YACIMIENTO RODOLFO ~ PROV. DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

fig. 9

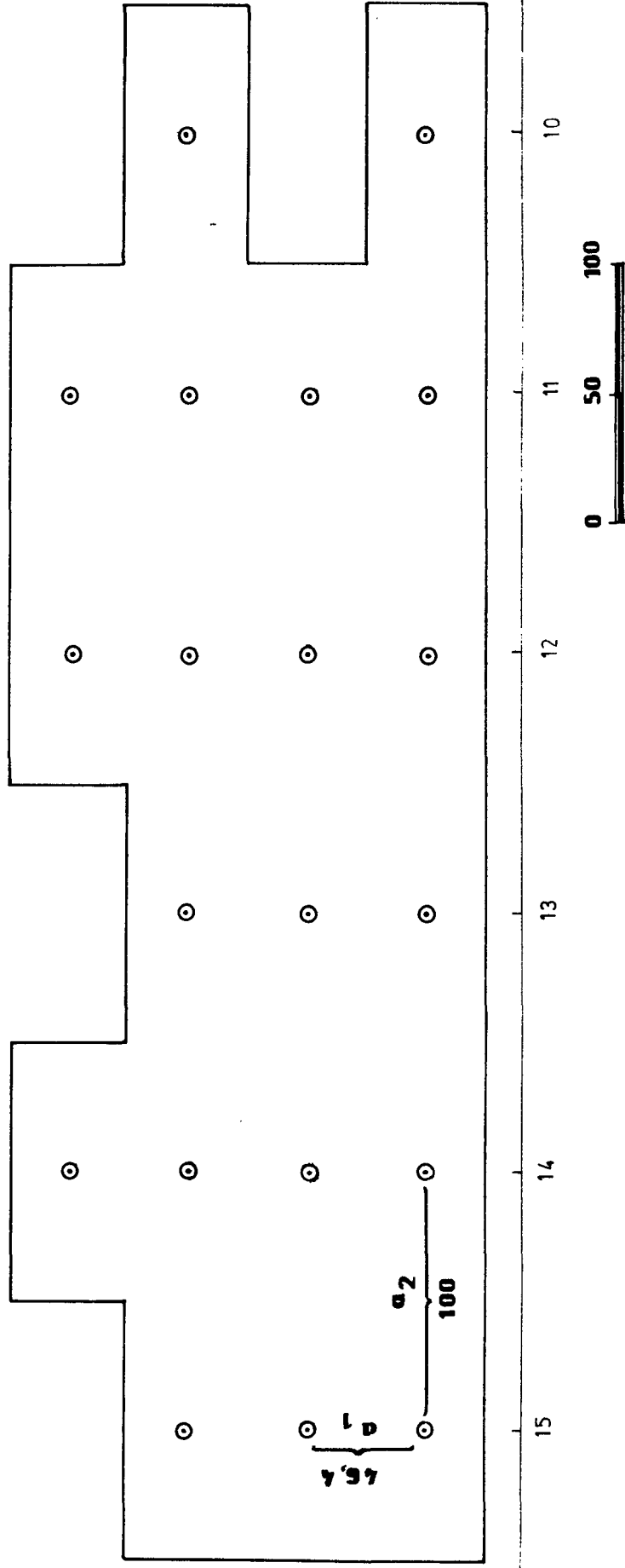
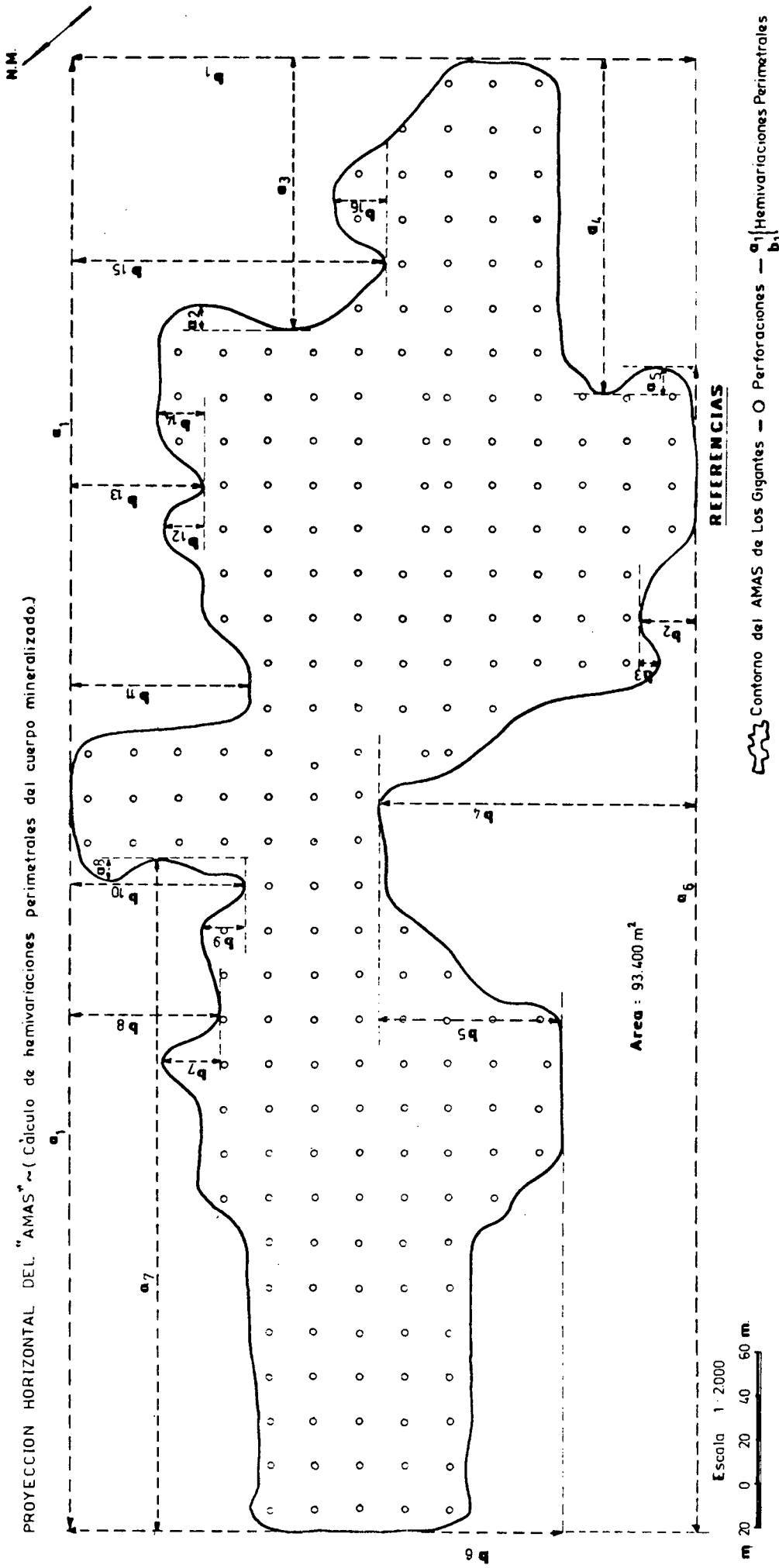


Fig. 10

YACIMIENTO SCHLAGINTWEIT ~ PROV. DE CORDOBA ~ REP. ARGENTINA

PROYECCION HORIZONTAL DEL "AMAS" ~ (Cálculo de hemivariaciones perimetrales del cuerpo mineralizado.)



Escala 1 : 2000

m 20 0 20 40 60 m

REFERENCIAS

Contorno del AMAS de Los Gigantes — a_1 | Hemivariaciones Perimetrales — b_1

