

YACIMIENTO ORO CASTELLANO: EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN ESPACIAL

Oro Castellano deposit: evaluation and comparison of spatial estimation techniques

Elmidio Estévez Cruz
José Quintín Cuador Gil

E-mail: estevez@geo.upr.edu.cu
Universidad de Pinar del Río

RESUMEN

Se evalúan y comparan distintas técnicas de estimación del contenido medio, que se usan en el control de ley, para determinar la que mejor se ajusta a las características de la mineralización del yacimiento Oro Castellano. Para ello se utilizó la información de la exploración de explotación de un sector del banco 95 de Susana, el cual se exploró en una red de 6 x 6 m. La simulación secuencial gaussiana fue usada para generar una imagen del sector, que posee la distribución estadística y la continuidad espacial del contenido de Au en los datos originales. El sector se simuló en una red de 1 x 1 m, lo que generó 36 valores dentro de cada bloque de 6 x 6 m. El contenido de oro de cada bloque fue estimado usando cuatro métodos sencillos: inverso de la distancia al cuadrado, Kriging ordinario, vecino más cercano (método de los polígonos) y la media aritmética de las muestras vecinas, que es el que tradicionalmente se emplea en el depósito.

Para comparar los métodos se utilizó el error cuadrático medio (ECM) del estimado del bloque respecto al "contenido real" y el porcentaje de los bloques, que son correctamente estimados como mena o estéril sobre la base de un *cut off* determinado. El estudio realizado pone en duda la idoneidad del método utilizado en el yacimiento y recomienda el empleo de técnicas de estimación que tomen en cuenta la continuidad espacial de la mineralización aurífera.

PALABRAS CLAVE: Interpolación espacial, simulación condicional, geoestadística.

ABSTRACT

Its evaluated and compared techniques of different grade estimation, used in grade control, in order to

determine the most suitable one to the characteristics of mineralization of Oro Castellano deposit. This goal was attained by using the grade control information of a sector of bench 95 of Susana, which was drilled in a 6 x 6 m grid. The sequential gaussian simulation was used to generate an image of the sector that posses the statistical distribution and the spatial continuity of Au grade in the original data. The sector was simulated in 1x1m grid, generating 36 simulated values within each 6 x 6 m block. The Au grade of each block was estimated using 4 simple methods: inverse distance squared, ordinary Kriging, nearest neighbor (method of polygon) and the arithmetic mean of neighboring samples, that is the one which is traditionally used in the deposit.

The mean squared error (MSE) of estimated grade respect to the "actual grade" of the block and the percentage of blocks that are correctly estimated as ore or waste on the basis of a given cutoff were used to compare the methods. The accomplished study puts on doubt the suitability of the method used in the deposit and recommends to use estimation techniques that take into account the spatial continuity of the auriferous mineralization.

KEY WORDS: Spatial interpolation, conditional simulation, geostatistics.

INTRODUCCIÓN

En su rutina diaria, durante el control de la ley, el geólogo de mina tiene que estimar el contenido medio del componente útil con la mayor confiabilidad posible, de forma tal que evite que bloques de menas sean enviados a la escombrera o que el estéril sea enviado

a la planta. Con el advenimiento de las computadoras se ha implementado una amplia gama de técnicas de interpolación espacial, pero no siempre resulta fácil determinar la que mejores resultados arrojará en un yacimiento dado. En la literatura científica se ha tratado de resolver esta cuestión, usando dos métodos fundamentales. El primero de ellos consiste en realizar estudios de reconciliación, o sea, comparar los resultados de la estimación por distintos métodos con los resultados de la producción (Healey, 1993; Sides, 1992). El otro método consiste en simular un sector, ensayar distintas técnicas de estimación y comparar los resultados con la realidad simulada (Bell, 1994).

El objetivo de este estudio es evaluar y comparar distintas técnicas de estimación del contenido medio, usadas en el control de ley, para determinar la que mejor se ajusta a las características de la mineralización del yacimiento Oro Castellano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la simulación condicional para evaluar y comparar distintos métodos de estimación del contenido medio de oro en bloques de 6 x 6 m, y así determinar el que mejor se ajusta a las características de la mineralización del yacimiento Oro Castellano.

Los datos empleados consisten en 118 pozos del control de ley (exploración de explotación) de un sector del banco 95 de Susana, en el depósito Oro Castellano. Este banco fue escogido porque la cantidad de información disponible permite mostrar los objetivos del trabajo y, además, por ser representativo del yacimiento. Los pozos fueron perforados en una red regular de 6 x 6 m. La base de datos contiene las coordenadas de todos los pozos y la ley de Au (g/t) en compósitos de 5 m que abarcan toda la altura del banco.

La simulación secuencial gaussiana fue usada para generar una imagen del sector que posee la distribución estadística y la continuidad espacial del contenido de Au en los datos originales. El contenido de oro de cada bloque fue estimado utilizando cuatro métodos sencillos: inverso de la distancia al cuadrado, Kriging ordinario, vecino más cercano (método de los polígonos) y la media aritmética de las muestras vecinas, que es el que tradicionalmente se emplea en el depósito.

Situación geográfica y geológica

El yacimiento Oro Castellano se encuentra en la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río, a 3,5 km del pueblo de Santa Lucía y a 46 km al norte de la ciudad de Pinar del Río. El depósito forma parte del

campo mineral Santa Lucía-Castellano, que ha sido considerado como una cuenca sedimentaria de edad jurásica (Valdés-Nodarse *et al.*, 1993). Los depósitos de esta zona han sido interpretados como pertenecientes al tipo sedex (Whitehed *et al.*, 1996). El yacimiento Oro Castellano (tipo Gossan) se hospeda en la zona de oxidación que cubre la mineralización primaria del yacimiento polimetálico Castellano (Valdés-Nodarse *et al.*, 1993). En el área afloran las rocas de la Fm. San Cayetano, de facies deltaicas, la cual esta constituida por areniscas, lutitas y esquistos. Esta formación pertenece al terreno Guaniguanico (Iturralde- Vinent, 1996).

Análisis exploratorio de datos y variografía

Este paso permitió establecer el carácter de la distribución de la ley de Au de compósitos de 5 m y cuantificar su continuidad espacial. El análisis exploratorio de datos consistió en el cálculo de la estadística descriptiva, la construcción del histograma y el análisis del tipo de distribución. En la tabla 1 aparece la estadística elemental de la ley de Au.

La distribución es bastante simétrica, lo que se manifiesta en la forma del histograma (Fig.1), y en la similitud de la media y la mediana. El coeficiente de variación es menor que 1, lo cual refleja la poca variabilidad del Au en el sector. De acuerdo con la prueba de bondad de ajuste Kolmogoro-Smirnov, el contenido de oro sigue una distribución normal. El análisis exploratorio también incluyó, como sugieren Isaaks y Srivastava (1989), un mapa de localización de los pozos, y otro de isocontenidos, obtenido por el método

TABLA 1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DEL CONTENIDO DE AU

No. de pozos	118
Mínimo	0,11
Máximo	3,66
Media	1,05
Mediana	1,09
Varianza	0,41
Coef. de variación	0,61
Kurtosis	1,05
Coef. de asimetría	0,71
Estadígrafo K-S	0,076
Valor crítico ($\alpha=0,1$)	0,111
Valor crítico ($\alpha=0,05$)	0,124
Valor crítico ($\alpha=0,01$)	0,148

do de triangulación con interpolación lineal (Fig. 2); dichos mapas permitieron conocer el comportamiento espacial de la ley de Au y chequear la existencia de los valores dudosos.

El análisis estructural se realizó a fin de investigar y cuantificar la variabilidad espacial del componente útil en el sector. Para esto, se estimaron y modelaron tres variogramas fundamentales: isotrópico, direccional E-O y direccional N-S (Fig. 3); fueron calculados, además, los variogramas en las direcciones NE y NO, y se comprobó que su comportamiento se encuentra, entre los calculados, en las direcciones de mayor y menor continuidad.

Los variogramas muestran una clara estructura espacial, con un alcance de alrededor de 27 metros y un efecto pepita muy cercano a cero. Todo esto confirma la poca variabilidad de la ley de Au en el sector. El modelo teórico obtenido para caracterizar la variabilidad espacial de la ley es:

$$\gamma(h)=0,04 + 0,38 \text{ Sph} (30,27) + 0,1\text{Sph} (13. 1300).$$

Simulación y muestreo

Para poder realizar la comparación entre los distintos métodos se necesita conocer cuál es el contenido real de Au en los bloques que se van a evaluar. Para ello se procedió a generar una imagen simulada del sector, la cual posee la misma distribución estadística (histograma, media, varianza) y similar continuidad espacial (variograma) que los datos originales. Además, los valores reales y simulados son iguales cuando ambos tienen la misma posición espacial. El modelo numérico de la mineralización se creó usando la técnica de simulación secuencial gaussiana (Journel y Alabert, 1990), la cual no es más que una aplicación del teorema de Bayes. La técnica requiere la inferencia de $n-1$ distribuciones sucesivas de probabilidad condicional, a través de una transformación gaussiana de los datos originales. El algoritmo, las ventajas y desventajas de la simulación secuencial gaussiana, aparecen explicados en Dowd (1994) y Deutsch y Journel (1998). Para generar el modelo simulado se utilizó el programa SGSIM de la librería de programas de geoestadística GSLIB (Deutsch y Journel, 1998).

La imagen simulada (Fig. 4) reproduce la variabilidad natural de la ley de Au, a diferencia de los métodos de estimación que tienden a suavizarla (Fig. 2). El sector se simuló en una red de 1 x 1m, lo que generó 36 valores de la ley de Au de compósitos de 5 m dentro de cada bloque de 6 x 6 m. El valor medio de esas 36 muestras fue considerado como el contenido "real" del bloque. Posteriormente, el sector simu-

lado fue muestreado 25 veces en una red similar a la utilizada para la exploración de explotación. Las nuevas bases de datos obtenidas como resultado del muestreo sistemático del modelo numérico se usaron para evaluar la bondades de cuatro técnicas diferentes de interpolación espacial.

Estimación

El contenido de oro de cada bloque (121 bloques en total) para cada una de las 25 nuevas bases de datos fue estimado empleando cuatro métodos sencillos: la media aritmética, vecino más cercano (método de los polígonos), inverso de la distancia al cuadrado y Kriging ordinario de bloque. Como el fundamento de cada uno de estos métodos aparece ampliamente descrito en la literatura científica (Isaaks y Srivastava, 1989), sólo se dan elementos generales de cada uno de ellos.

El método de la media aritmética, que consiste en promediar los valores de los pozos que rodean el bloque por estimar, ha sido tradicionalmente empleado en el depósito, razón esta por la cual también se seleccionó para este estudio. La técnica del vecino más cercano (método no estadístico) asigna al bloque el valor del pozo que se ubica en el centro y hace caso omiso al resto de los pozos. El método del inverso de la distancia al cuadrado, pondera utilizando el inverso de la distancia entre el punto por estimar y las muestras cercanas. Los resultados de la variografía se utilizaron para definir la vecindad de búsqueda (≈ 30 m) de este método. El Kriging ordinario es el único método de los evaluados que hace uso de la autocorrelación espacial para estimar y, además de cuantificar el error cometido durante la interpolación en los puntos desconocidos. Todas las estimaciones fueron realizadas con el software de modelación de superficies Surfer 7.0.

Evaluación y comparación

Para comparar los métodos se utilizaron dos criterios. El primero fue el error cuadrático medio (ECM) (Weber y Englund, 1992) del estimado de los 121 bloques en las 25 bases de datos, respecto al contenido real del sector simulado.

$$ECM = 1/25 \sum_{J=1}^{25} (1/121 \sum_{J=1}^{121} (Zestji - Zreal)^2)$$

El segundo, el porcentaje de correcta clasificación de los bloques estimados. En otras palabras, la probabilidad de que un método dado estime los bloques reales de mena como mena y los estériles como ganga, sobre la base de un *cut off* de 0,3 g/t.

RESULTADOS

En términos del ECM, el Kriging ordinario (6,28) resultó levemente más preciso que el inverso de la distancia al cuadrado (6,36); el vecino más cercano ocupa la última posición con 14, mientras que el método empleado rutinariamente en el depósito ocupa la tercera posición (Fig. 5). Respecto al porcentaje de bloques correctamente clasificados, el Kriging con 95,44 %, superó al inverso de la distancia con 95,17, y el método de los polígonos, con 89,42 %, fue el de peor resultado (Fig. 6).

También, como parte de este trabajo, se obtuvo un mapa de incertidumbre de la estimación que refleja la probabilidad que tiene cada bloque de estar por encima de la ley de corte (Fig. 7). Para esto, se generaron 30 nuevas imágenes independientes del sector y se calculó el valor de ley de Au en los bloques para cada simulación. Con estos resultados se construyó un histograma para cada uno de los 121 bloques y, a partir de éste, se determinó la probabilidad de que la ley del bloque (6 x 6 m) sobrepase la ley de corte.

CONCLUSIONES

- La metodología empleada permite evaluar la precisión de distintas técnicas de interpolación espacial y así decidir cuál es la que brinda mejores resultados en un yacimiento dado.
- El estudio pone en duda la idoneidad del método que tradicionalmente se ha usado para estimar la ley de los bloques durante el control de ley en el yacimiento.
- El Kriging ordinario es el interpolador espacial que arroja los mejores resultados, tanto en términos del ECM como en el criterio de correcta clasificación de los bloques.
- La ley de Au en compósitos de 5 m en el sector tiene una clara continuidad espacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELL, T. M., K. G. WHATELEY: "Evaluation of grade estimation techniques", en K. G. Whateley: *Case Histories and Methods in Mineral Resource Evaluation II*, Geological Society Special Publication, no. 79, pp. 67-86, 1994.
- DEUTSCH, C. V., A. G. JOURNAL: *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, New York, 1998.
- DOWD, P. A.: "Optimal Open Pit Design: Sensitivity to estimated block values", en K. G. Whateley: *Case Histories and Methods in Mineral Resource Evaluation II*, Geological Society Special Publication, no. 79, pp. 87-94, 1994.
- HEALEY, C. M.: "Performance of Reserve Estimation techniques in the Presence of Extremely High grade Samples, Jasper Gold Mine, Saskatchewan", *Explor. Mining Geol.* 2(1) :41-47, 1993.
- ISAACS, E. H. Y R. M. SRIVASTAVA: *An Introduction to Applied Geostatistics*, 561 pp., Oxford University Press, New York, 1989.
- ITURRALDE-VINENT, M. A.: "Introduction to Cuban Geology and Geophysics", en *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. Project 364. Caribbean Ophiolites and Volcanic Arc. Special Contribution, no. 1, pp. 121-130, 1996.
- JOURNAL, A. G. Y F. ALABERT: *New method for reservoir mapping*, JTP, pp. 212-218, 1990.
- SIDES, E. J.: "Reconciliation Studies", en A. E. Annels: "Case Histories and Methods in Mineral Resource Evaluation", *Geological Society Special Publication*, no. 63, pp.197-218, 1992.
- VALDÉS-NODARSE, E. L., A. DÍAZ-CARMONA, J. F. DAVIES, R. E. WHITEHEAD Y L. FONSECA: "Cogenetic sedex Zn-Pb and stockwork Cu ore, Western Cuba", *Explor. Mining Geol.* 2(4) :297-305, 1993.
- WEBER, D. Y E. ENGLUND: "Evaluation and comparison of spatial interpolators", *Math. Geology*. 24(4):381-391, 1992.
- WHITEHEAD, R. E., J. F. DAVIES, E. L. VALDÉS-NODARSE Y A. DÍAZ-CARMONA: "Mineralogical and Chemical Variation, Castellanos Shale-Hosted Zn-Pb-Ba Deposit, Northwestern, Cuba", *Economic Geology*, 91:713-722, 1996.

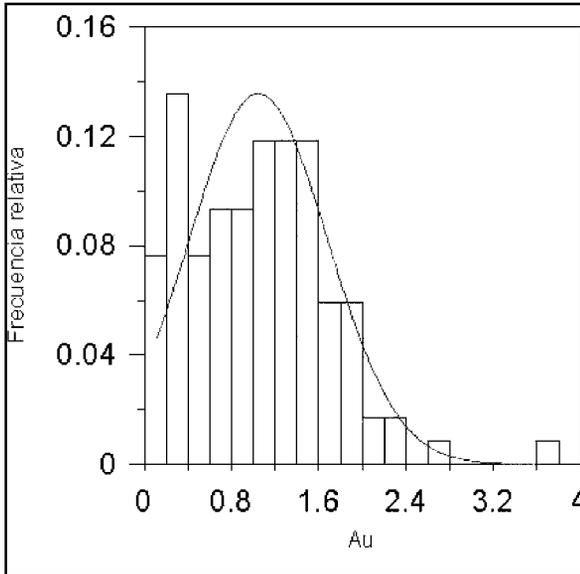


Figura 1. Histograma de Au (g/t) en el sector de estudio.

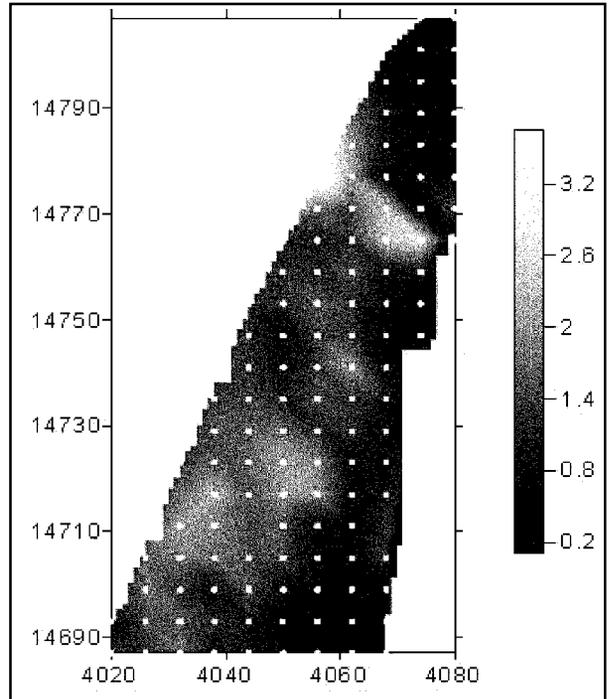


Figura 2. Mapa de isocontenidos de Au (g/t) y de localización de los pozos.

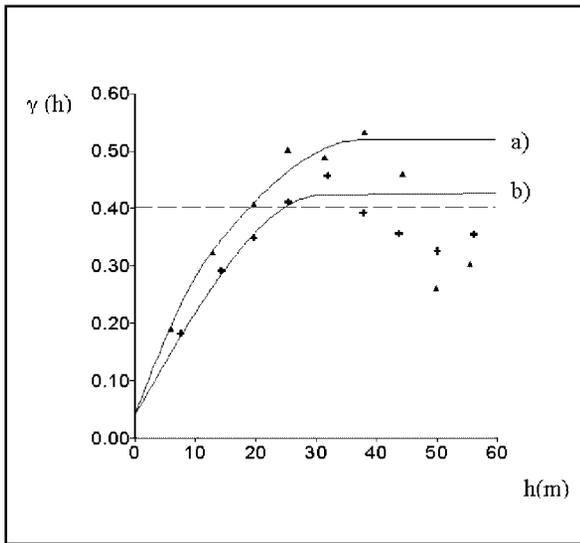


Figura 3. Variogramas experimentales de la ley de Au. Omni-variograma isotrópico; N-S: variograma en la dirección norte-sur; E-W: variograma en la dirección este-oeste

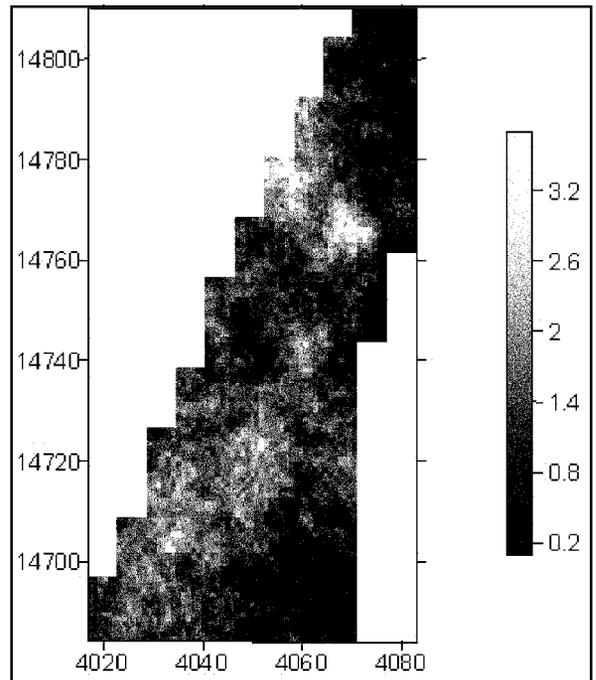


Figura 4. Imagen simulada de la ley de Au (g/t) en el sector de estudio.

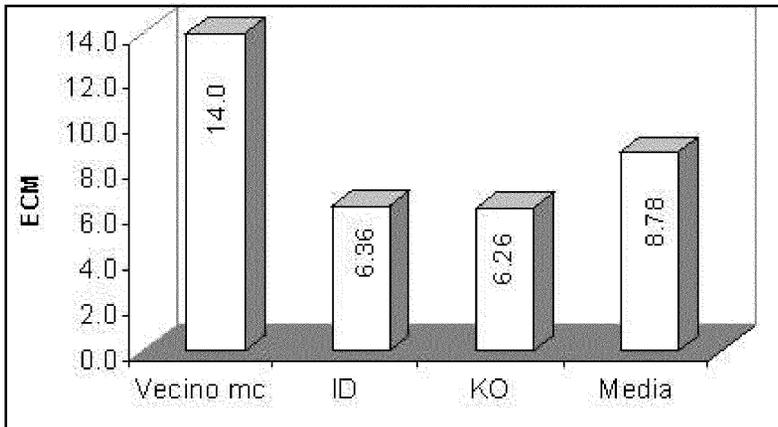


Figura 5. Error cuadrático medio de las distintas técnicas evaluadas.

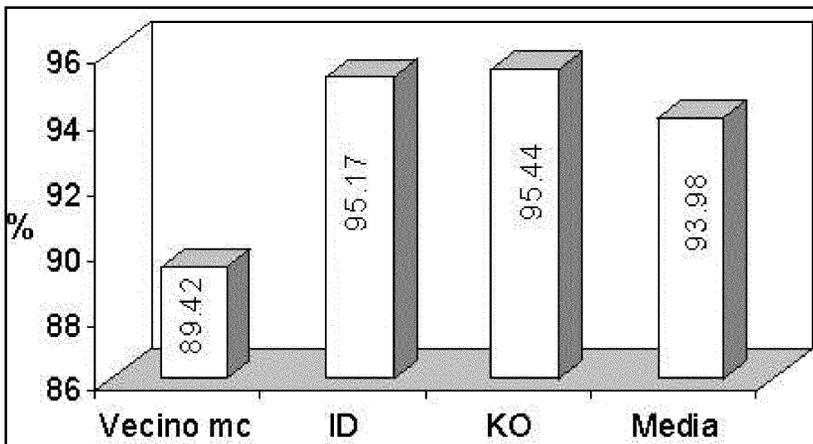


Figura 6. Porcentaje de correcta clasificación para cada método de estimación.

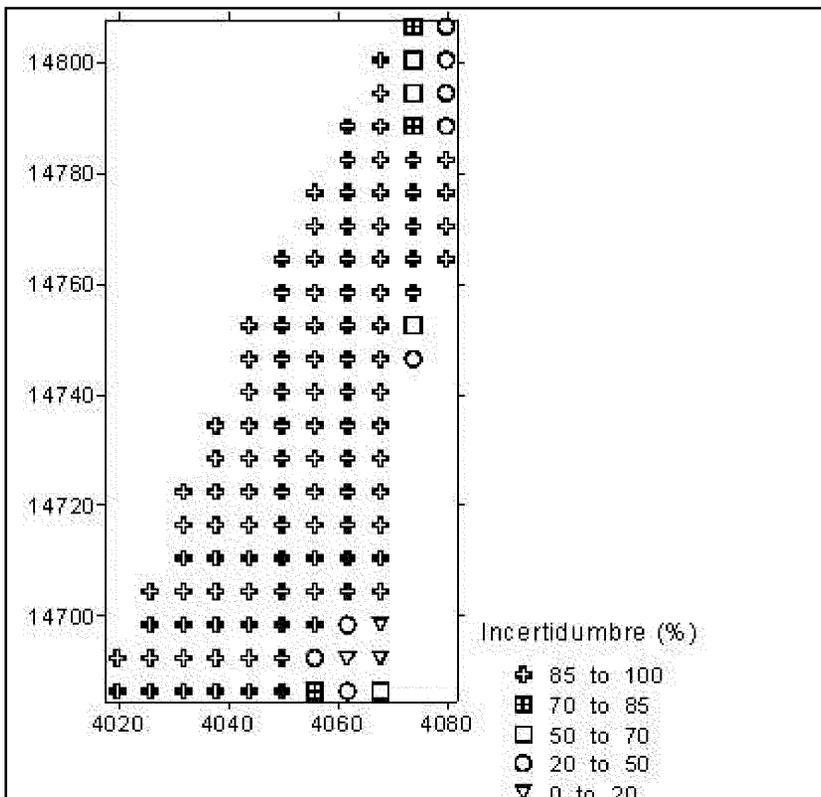


Figura 7. Mapa de incertidumbre que indica la probabilidad de que la ley del bloque (6 x 6 m) sea menor que la ley de corte.