



Estimación del campo de conductividades hidráulicas en pilas de lixiviación

Estimation of field of hydraulic conductivities in heap leaching

Delahaye, Carlos H.¹ ✉ - Berenguer, Tadeo A.¹ - Bilbao, M. Alejandra¹ - Gatica, Graciela¹

Recibido: 23 de noviembre de 2019 • Aceptado: 21 de abril de 2020

Resumen

La distribución espacial de la conductividad hidráulica es una de las propiedades que más influye sobre el flujo de líquido de solución extractiva, a través de una pila de lixiviación de minerales. En este trabajo se presenta una metodología basada en técnicas geoestadísticas y geofísicas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en una pila de lixiviación de minerales. El estudio se realiza con la información proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación de minerales del Proyecto Minero Gualcamayo, ubicado en el departamento Jáchal de la provincia de San Juan. La variable proporcionada por la geofísica es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad permite tanto estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, como la varianza del error, que da una idea de la precisión y el grado de incertidumbre en la estimación. De esta forma, se obtiene un modelo matemático de distribución de resistividades, a partir del cual se estiman contenidos de humedad, porosidades y conductividades hidráulicas en el interior de la pila. Los resultados del modelo permiten identificar sectores de la pila de lixiviación con distintas permeabilidades, lo que condiciona el riego del mineral, conduciendo al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos que condicionan el rendimiento en la extracción del mineral.

Palabras Claves: lixiviación en pilas, conductividad hidráulica, resistividad eléctrica, método geoestadístico.

Abstract

Hydraulic conductivity is one of the properties that most influences the leaching solution flow through a mineral heap leach. This paper presents a methodology based on geostatistical and geophysical techniques in order to determine the spatial distribution of hydraulic conductivity in a mineral heap leach. The study is carried out with specific information provided by geophysical profiles carried out in the mineral heap leach of the Gualcamayo Mining Project, located in the Jáchal department of the San Juan province. The variable provided by the geophysical study is electrical resistivity. The statistical and geostatistical analysis of this property makes it possible to estimate values of electrical resistivity in volumetric units, as well as enabling the variance of the error, which gives an idea of the accuracy and degree of uncertainty in the estimation.

1. Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan,
Av. Libertador San Martín 1109 oeste, San Juan, Argentina.

✉ delahaye@unsj.edu.ar

Thus, a mathematical model of resistivities distribution is obtained, from which moisture contents, porosities and hydraulic conductivities inside the heap are estimated.

The modeling results makes it possible to identify areas of the heap with different permeabilities, under different conditions of mineral irrigation, which lead to the development of heterogeneous liquid flows that condition the performance in the mineral extraction.

Keywords: *heap leaching, hydraulic conductivity, electric resistivity, geostatistical methods.*

INTRODUCCIÓN

El proceso de lixiviación en pilas permite utilizar yacimientos de baja ley siempre que la operación minera involucre una actividad a gran escala. La mena en bruto proveniente de la mina, o bien fragmentada mediante trituración (y eventualmente molienda), es conducida al área de lixiviación y ubicada en capas, formando grandes pilas, las cuales son regadas superficialmente con soluciones químicas para extraer los minerales valiosos.

Durante el apilamiento del mineral es inevitable el desarrollo de capas y regiones en su interior con zonas de material de estructura distinta. Ello es debido al proceso natural de segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. Por lo tanto, la conductividad hidráulica del material de la pila resulta en general heterogénea, provocando que el flujo de la solución lixivante en su interior no sea uniforme y se lleve a cabo a través de vías preferenciales de circulación, dejando áreas de la pila sin lixiviar, lo cual disminuye el rendimiento de la operación y, en algunos casos, conduce a afloramientos de líquido por la superficie de los taludes, afectando las condiciones de estabilidad y aumentando las posibilidades de contaminación del medioambiente (Thiel and Smith, 2004).

En este trabajo se aplican técnicas geoestadísticas para determinar la distribución espacial de la conductividad hidráulica en el interior de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo, ya que estas técnicas constituyen un procedimiento válido y confiable para la categorización y clasificación de variables regionalizadas, puesto que refleja la cantidad y calidad de la información empleada.

El proyecto Gualcamayo está ubicado en el ámbito geológico de la Precordillera Centro-Oeste de Argentina, a 270km al norte de la ciudad de San Juan, en el departamento Jáchal. El acceso a la mina se realiza a la altura del kilómetro 3700 de la Ruta Nacional N° 40. La mina posee dos pilas de lixiviación denominadas Pila Sur cuya explotación finalizó en el 2013 y Pila Norte actualmente en explotación. La Figura 1 muestra la ubicación del proyecto Gualcamayo (A), una vista general de las pilas de lixiviación (B) y la ubicación de los perfiles del estudio geofísico realizado en la pila Norte (C).

El estudio se realiza con la información puntual proporcionada por perfiles geofísicos realizados en la pila de lixiviación Norte por Rodríguez y Mazuelos (2015). La variable proporcionada por el estudio es la resistividad eléctrica. El análisis estadístico y geoestadístico de esta propiedad física permite estimar valores de resistividad eléctrica en unidades volumétricas, así como la varianza del error que da una idea de la precisión, y el grado de incertidumbre en la estimación a partir del análisis y caracterización de los datos. Se obtiene así un modelo matemático de distribución

de resistividades específicas a partir del cual se estiman contenidos de humedad, porosidades y conductividades hidráulicas en el interior de la pila.

La observación de los perfiles de resistividad eléctrica en secciones de la pila sugiere una estructura heterogénea y flujo concentrado sobre caminos preferenciales. La Figura 2 muestra la distribución de resistividades eléctricas en el Perfil PE5 de la Pila de Lixiviación Norte de la Mina Gualcamayo, obtenido mediante tomografía eléctrica, en el cual puede observarse la disposición de las diferentes capas de resistividad del terreno, diferenciadas en colores, cada una de ellas identificando a un rango de resistividad determinado, el cual está graficado en la escala ubicada debajo del perfil.

En base al análisis e interpretación geotécnica se han identificado zonas con distinto contenido de humedad asociadas al estado de riego de la pila separadas por una línea de color negro. En superficie se pueden observar zonas saturadas por el riego desde la progresiva 0 a la 192 m, pero luego a los 5 m de profundidad y hasta los 20 m se encuentra una zona semisaturada con apariencia estratificada, lo que sugiere la existencia de un material de mayor permeabilidad en los primeros 15 a 20 metros de la pila. A mayor profundidad la permeabilidad disminuye debido a la mayor compactación de la zona inferior del apilamiento, saturando la zona central de la pila, en un espesor superior a 40 m.

Los resultados del estudio permiten zonificar, con un alto grado de seguridad, sectores de la pila de lixiviación bajo distintas condiciones de riego de la solución lixivante, las cuales conducen al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos que inciden desfavorablemente sobre el rendimiento de la operación de la pila. El estudio se ha llevado a cabo utilizando el programa WinGSLIB, el cual es una actualización del programa original GSLIB, acrónimo de Geostatistical Software LIBrary (Deutsch and Journel, 1992, 2011).

MÉTODO GEOESTADÍSTICO

El estudio de fenómenos con correlación espacial por medio de métodos geoestadísticos surgió a partir de los años sesenta, especialmente con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados (David, 1977; Journel and Huijbregts, 1978).

La columna vertebral del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de autocorrelación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como kriging y cokriging. Otros temas importantes dentro del estudio de información georreferenciada son el diseño de redes de muestreo (Mcbratney et al., 1981.), la geoestadística multivariada (Wackernage, 1995) y la simulación (Deutsch and Journel, 2011).

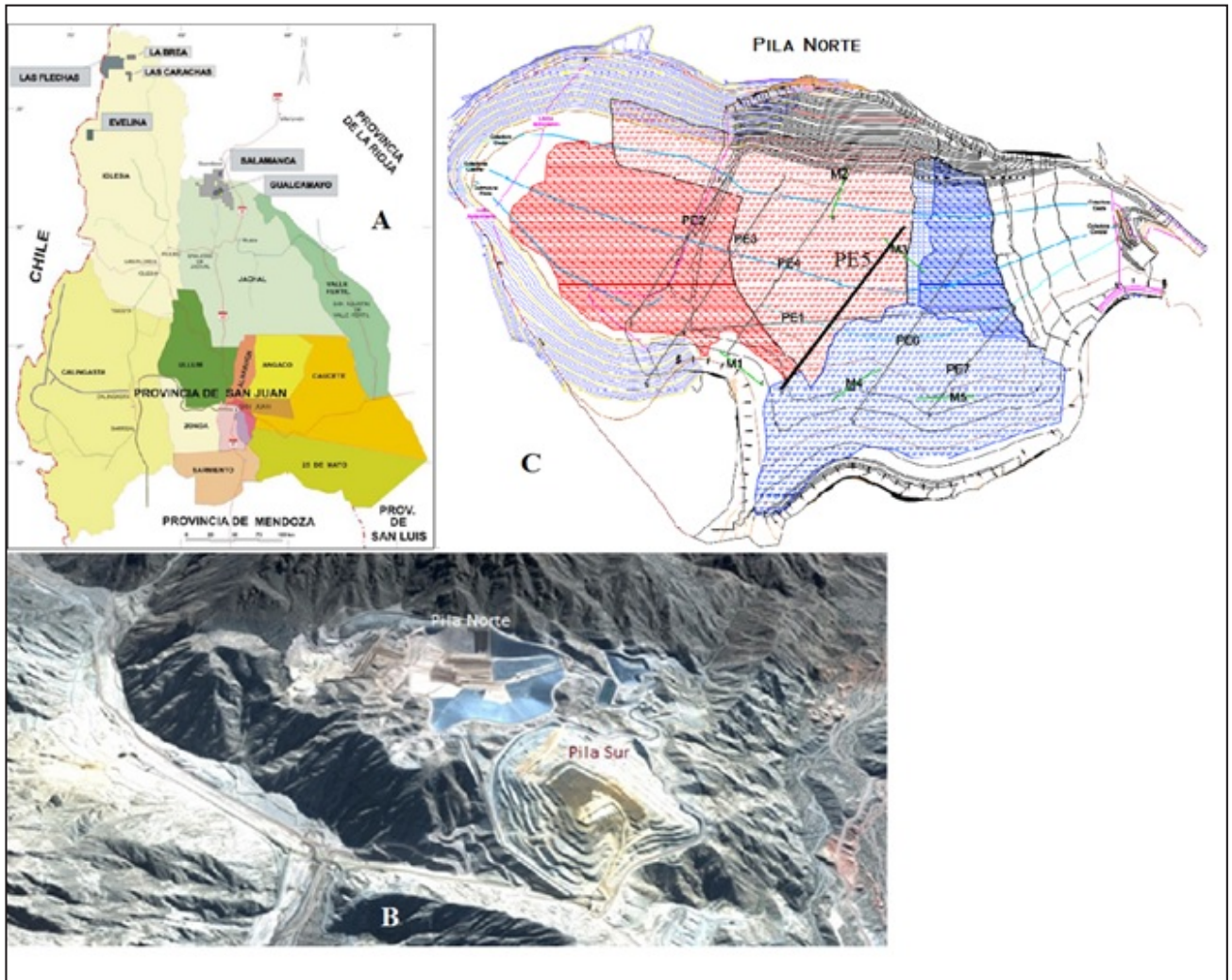


Figura 1. A-Ubicación del proyecto Gualcamayo; B - Vista general de las pilas de lixiviación Norte y Sur; C - Ubicación del perfil PE5 en la pila Norte.

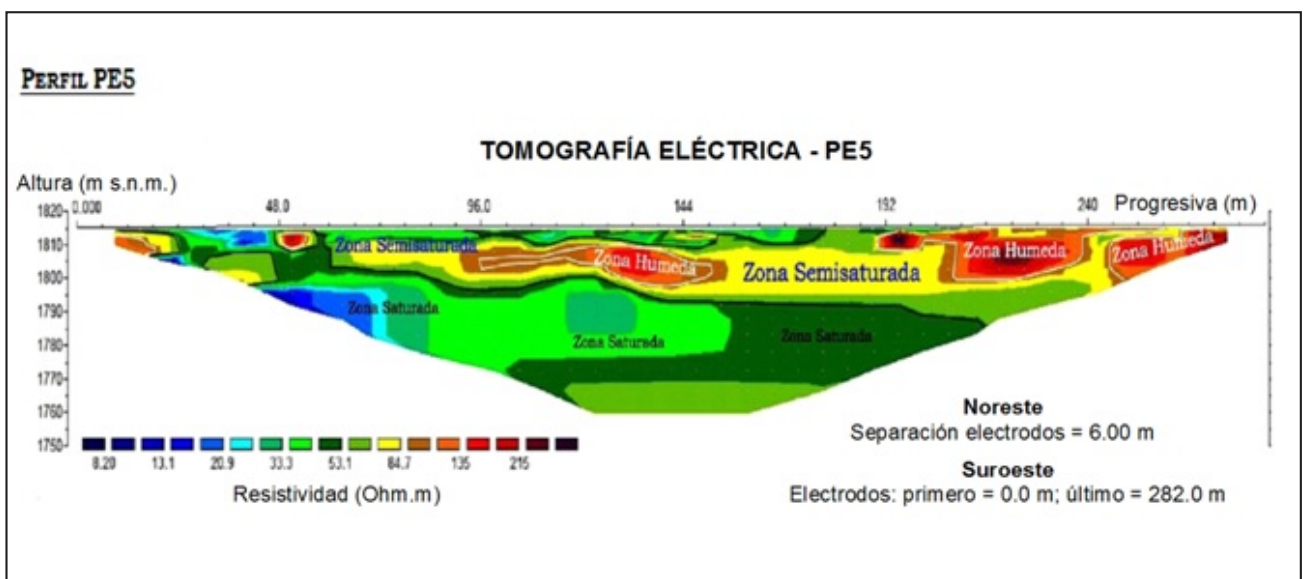


Figura 2. Resistividades eléctricas. Perfil PE5. Pila de Lixiviación Norte. Mina Gualcamayo.

En el método geoestadístico se aplican técnicas a fin de analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en el espacio o el tiempo, los cuales no se consideran independientes sino correlacionados unos con otros, de forma tal que mientras más cercanos estén situados dos puntos estarán más correlacionados y viceversa (Deutsch and Journel, 1992, 2011).

El método geoestadístico está compuesto básicamente por tres etapas (Figura 3):

1. Análisis exploratorio de los datos: se busca identificar localización, variabilidad, forma y observaciones extremas.
2. Análisis estructural: consiste en identificar de manera experimental (con base en datos muestrales) la estructura de autocorrelación espacial, para algunas distancias dadas, de un conjunto de datos de una variable, generalizando luego dicha estructura para cualquier distancia entre los sitios de observación.
3. Estimación (kriging): una vez detectada la autocorrelación espacial, el siguiente paso es la predicción en sitios de la región de estudio donde no se ha hecho medición de la variable de interés.

ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE RESISTIVIDADES EN EL PERFIL PES

Los estudios geofísicos realizados en la Pila de Lixiviación Norte (Rodríguez y Mazuelos, 2015) abarcaron 7 perfiles de tomografía geoelectrica (PE1, PE2,..., PE7) y 5 perfiles sísmicos MASW- Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (M1, M2,..., M5). En la Figura 4 se muestra la ubicación de los perfiles, la cota nivel y el estado del riego de las celdas correspondiente al 16/06/2014.

Los resultados del estudio muestran que el mineral apilado posee una litología granular arenosa uniforme en su mayor parte, indicando que el mineral en estado seco posee una resistividad similar en todo el volumen con valores comprendidos entre los 100 y 400 Ohm.m.

El riego de la pila provoca cambios de resistividad en función del estado de humedad existente, indicando zonas de mayor o menor permeabilidad del apilamiento. Así se pueden distinguir sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco riego y valores de resistividad bajos correspondiente a sectores con mayor riego.

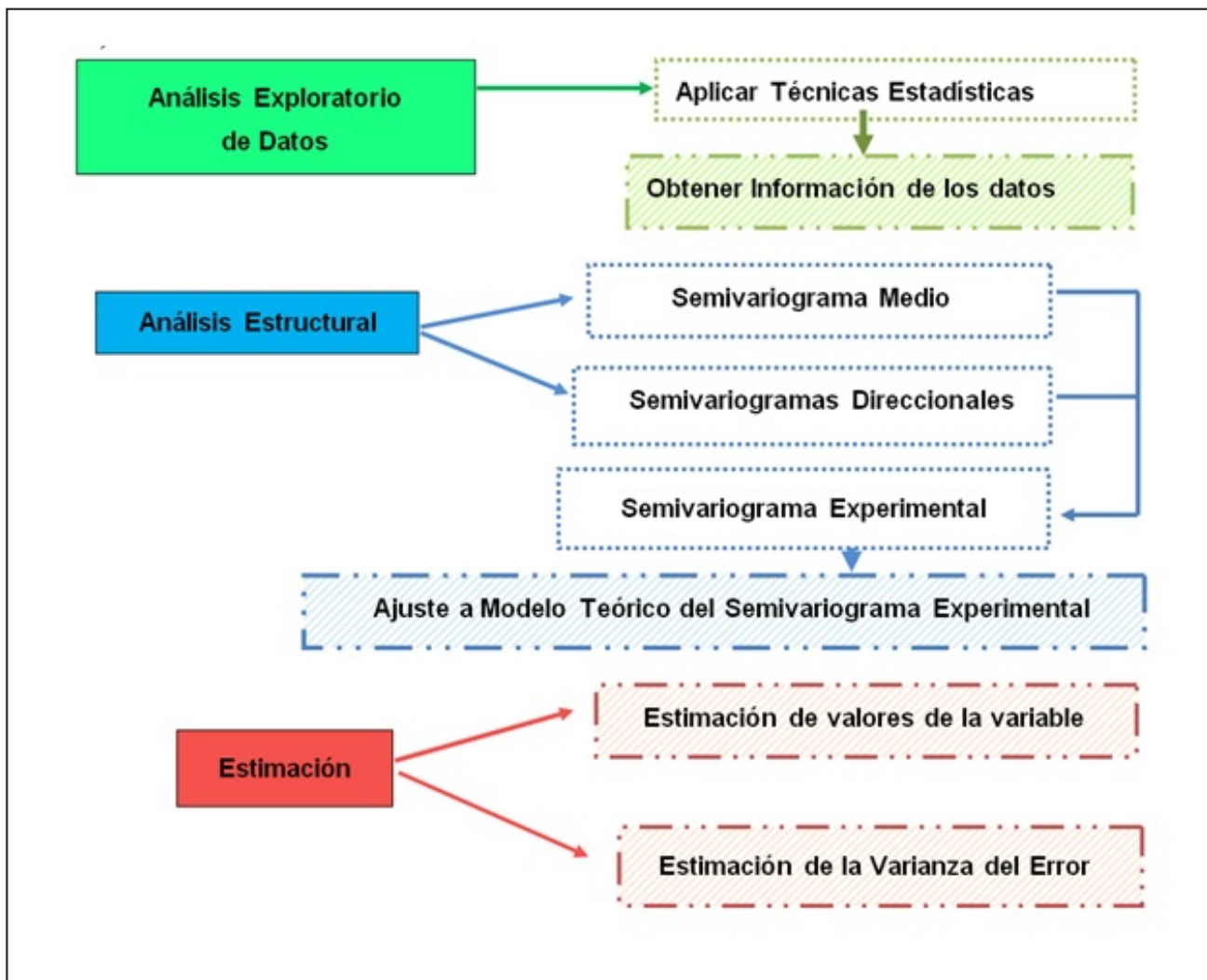


Figura 3. Método Geoestadístico.

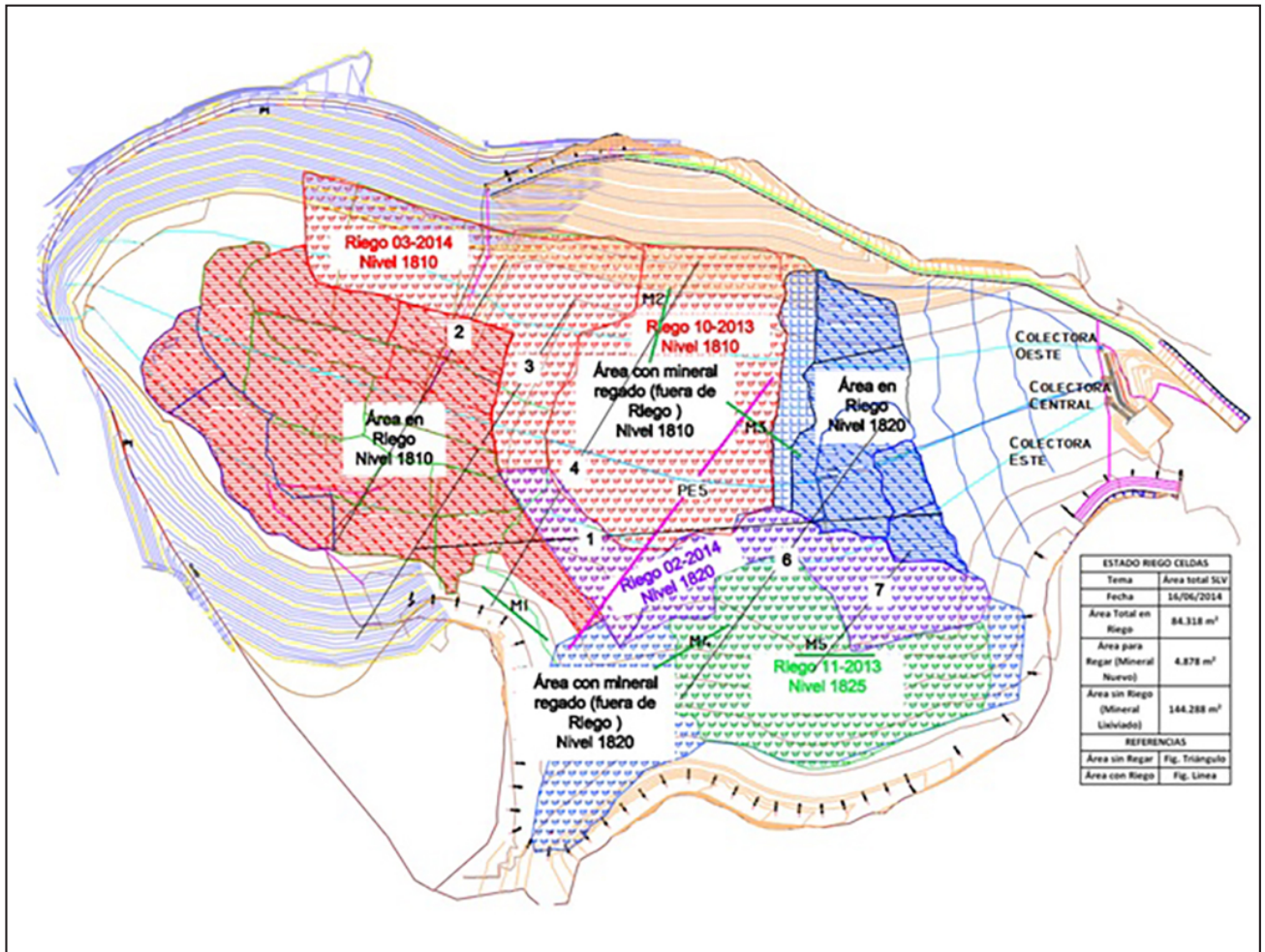


Figura 4. Perfiles geofísicos y MASW. Pila de lixiviación Norte. Mina Gualcamayo.

La mayoría de los perfiles muestran en superficie y hasta 5 a 7 m de profundidad la presencia de zonas con resistividades inferiores a 50 Ohm. m, que corresponden a estratos con alto contenido de humedad debido a que la mayor parte de las celdas estaban siendo regadas en el momento de realizar la geoelectrónica. A partir de los 5 a 7 m y hasta los 25 metros de profundidad la mayoría de los perfiles muestran valores de resistividad superiores a 50 Ohm.m, correspondiente a un material con menor contenido de humedad. Por debajo de la zona antes nombrada se observan zonas saturadas en la mayoría de los perfiles, debido a la disminución de la porosidad por el peso del material suprayacente y al equilibrio establecido entre el sistema de drenaje y la permeabilidad del material apilado.

En este trabajo se ha utilizado la información puntual correspondiente al perfil geofísico PE5. La variable proporcionada para el estudio es la resistividad eléctrica.

La base de datos del PE5 contiene 450 valores de resistividad, los cuales se distribuyen cada 6 m en horizontal y en 14 capas en profundidad, abarcando una longitud total aproximada de 280 m en superficie y extendiéndose hasta una profundidad de 60 m aproximadamente, siguiendo el perfil de forma trapezoidal invertido típico del ensayo geofísico (Figura 2).

Análisis exploratorio de datos

La geoestadística busca estudiar una o varias variables regionalizadas con valores obtenidos de una muestra. Previo al uso de métodos geoestadísticos propiamente dichos, conviene realizar un estudio exploratorio de los datos disponibles, el cual tiene tres objetivos:

1. Analizar mediante herramientas estadísticas simples la cantidad, calidad y ubicación de los datos disponibles.
2. Definir la(s) zona(s) de estudio. Una división del campo en varias sub-zonas puede ser relevante si uno observa cambios abruptos en la distribución espacial de valores, o si la geología del fenómeno lo indica.
3. Anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local (por ejemplo, presencia de valores atípicos que se destacan de aquellos de los datos vecinos).

En la Figura 5 se muestran los valores puntuales de resistividad medidos en el perfil PE5. El mapa da una primera idea de la distribución de los valores en la zona de estudio. Se puede apreciar tanto en vertical como en horizontal los cambios de resistividad en el terreno.

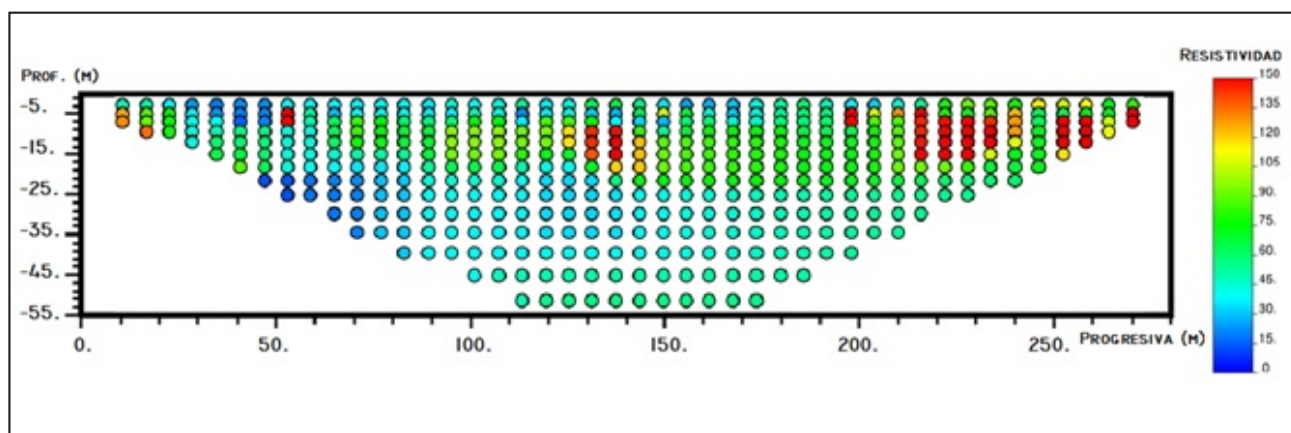


Figura 5. Mapa de ubicación de los datos de resistividad eléctrica medidos en el perfil PE5.

El análisis estadístico descriptivo de los datos de resistividad eléctrica puede observarse en las Figuras 6 y 7, las cuales muestran el histograma y la distribución de frecuencias acumuladas de la resistividad eléctrica.

El histograma del perfil PE5 resulta con asimetría a la derecha. Los datos medidos se ubican en el rango de resistividades esperadas para el tipo de material apilado (12,05 -250,4 Ohm.m) indicando zonas con distintos contenidos de humedad asociados al estado de riego y zonas con mayor o menor permeabilidad a lo largo del perfil.

No se detectan valores atípicos. Las intercalaciones de zonas de alta resistividad en estratos de resistividad media o baja analizados en un contexto con criterio físico sugieren zonas de material de diferente permeabilidad, debido a la mayor compactación que sufren las capas de mineral ubicadas a mayor profundidad y a la humedad existente en el material por el estado de riego durante el estudio. Esto está también de acuerdo con lo observado en el ensayo M3 (MASW3) realizado en el último tramo de este perfil, el cual muestra que a partir de los 20 m de profundidad la densidad del material aumenta notablemente.

La función de distribución acumulada $F(x)$ indica el comportamiento de la muestra y permite observar que la distribución de la resistividad no tiende a la normalidad.

Del análisis de la distribución de frecuencias en el perfil PE5 se puede inferir que valores de resistividad eléctrica entre 0 y 50 Ohm.m representan el 42% de los datos, entre 50 y 100 Ohm.m representan el 46% de los datos y que el 12% restante ocupa un rango más amplio, entre los 100 y los 250 Ohm.m.

Análisis estructural

El análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad. La función básica en geostatística que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés se conoce como semivariograma o variograma.

La construcción del semivariograma a partir de los datos permitirá analizar el comportamiento espacial de la resistividad específica en el perfil a los efectos de detectar:

- Direcciones de anisotropía.
- Zonas de influencia y su extensión (correlación espacial).

c) Variabilidad con la distancia.

Con los datos del perfil PE5 se construyeron los variogramas experimentales omnidireccional, en dirección vertical y en dirección horizontal, observando su comportamiento y la tendencia que muestran. Por medio de éstos se caracterizó la dependencia espacial de las variables analizadas según dichas direcciones. Luego se realizó el ajuste utilizando un modelo teórico de variograma tipo esférico omnidireccional y en dirección vertical y horizontal. Las Figuras 8, 9 y 10 muestran los variogramas experimentales y los modelos teóricos de ajuste del variograma omnidireccional y para las direcciones horizontal y vertical respectivamente. También se han indicado en las figuras los datos GSLIB para el modelo experimental y de ajuste en cada caso.

El variograma teórico de ajuste del variograma omnidireccional indicado en la Figura 8 resulta de tipo esférico, con efecto pepita de 90 (Ohm.m)^2 , meseta (varianza) de 1300 (Ohm.m)^2 y alcance de 12 m.

El variograma teórico de ajuste en dirección vertical indicado en la Figura 9 resulta de tipo esférico, con efecto pepita de 90 (Ohm.m)^2 , meseta (varianza) de 1350 (Ohm.m)^2 y alcance de 13 m. En la dirección horizontal (Figura 10) el variograma de ajuste también resulta de tipo esférico, con meseta de 1100 (Ohm.m)^2 , alcance de 19 m y efecto pepita de 250 (Ohm.m)^2 .

El estudio variográfico indica la existencia de una anisotropía geométrica dado que los variogramas presentan aproximadamente la misma meseta (varianza) pero alcance distinto. El alcance del variograma representa la distancia a partir de la cual no hay correlación. El alcance en dirección horizontal resulta mayor que en dirección vertical, indicando una mayor continuidad espacial en horizontal que en vertical, lo que da idea de una estructura heterogénea del material, con una disposición en capas horizontales, lo que está de acuerdo con lo observado en la realidad (Figura 2).

El efecto pepita en la dirección horizontal indica una discontinuidad del variograma en el origen. Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre los datos y puede deberse a errores de medición o a la escala de la misma (la distancia entre electrodos en el ensayo geofísico fue de 6 m). También podría indicar que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

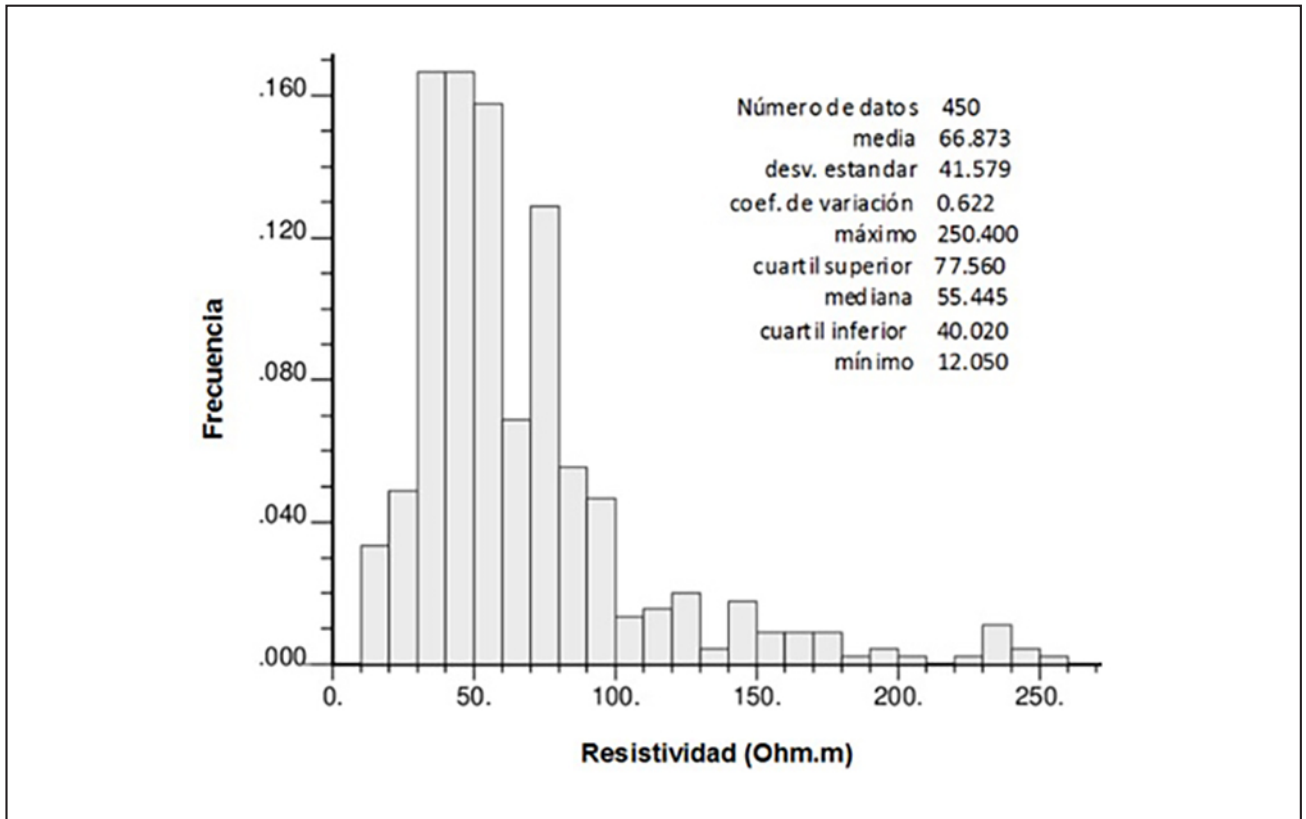


Figura 6. Histograma de la resistividad eléctrica medida en el perfil PE5.

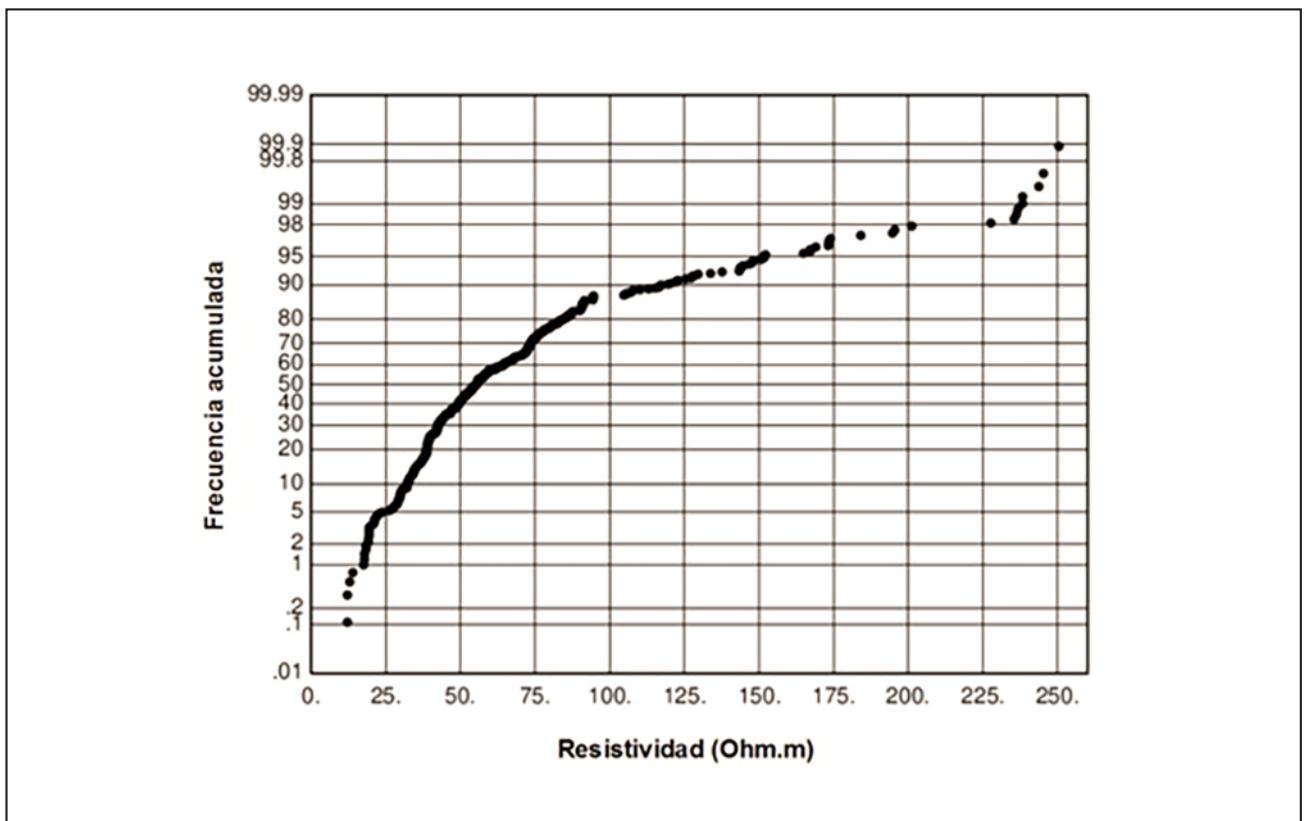


Figura 7. Diagrama de frecuencias acumuladas de resistividad eléctrica.

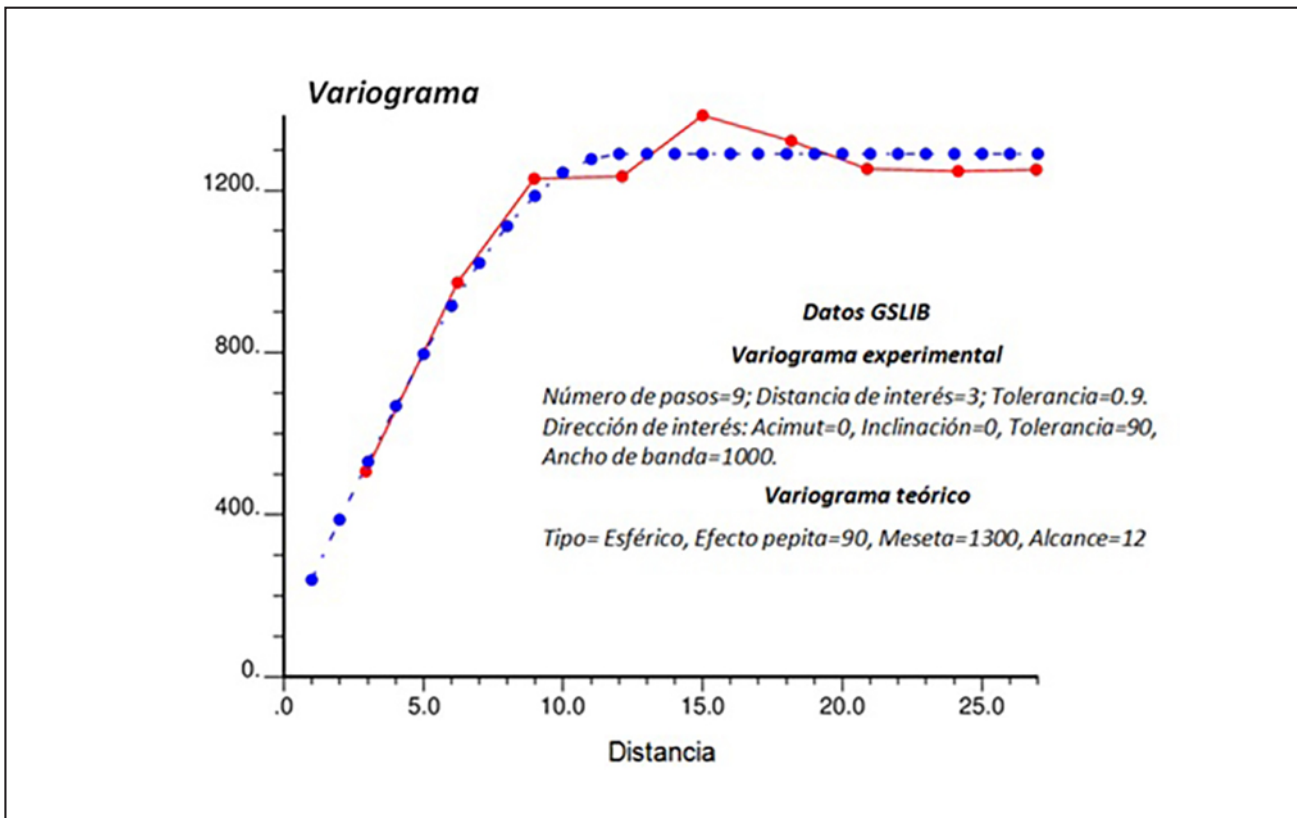


Figura 8. Variograma omnidireccional experimental y teórico.

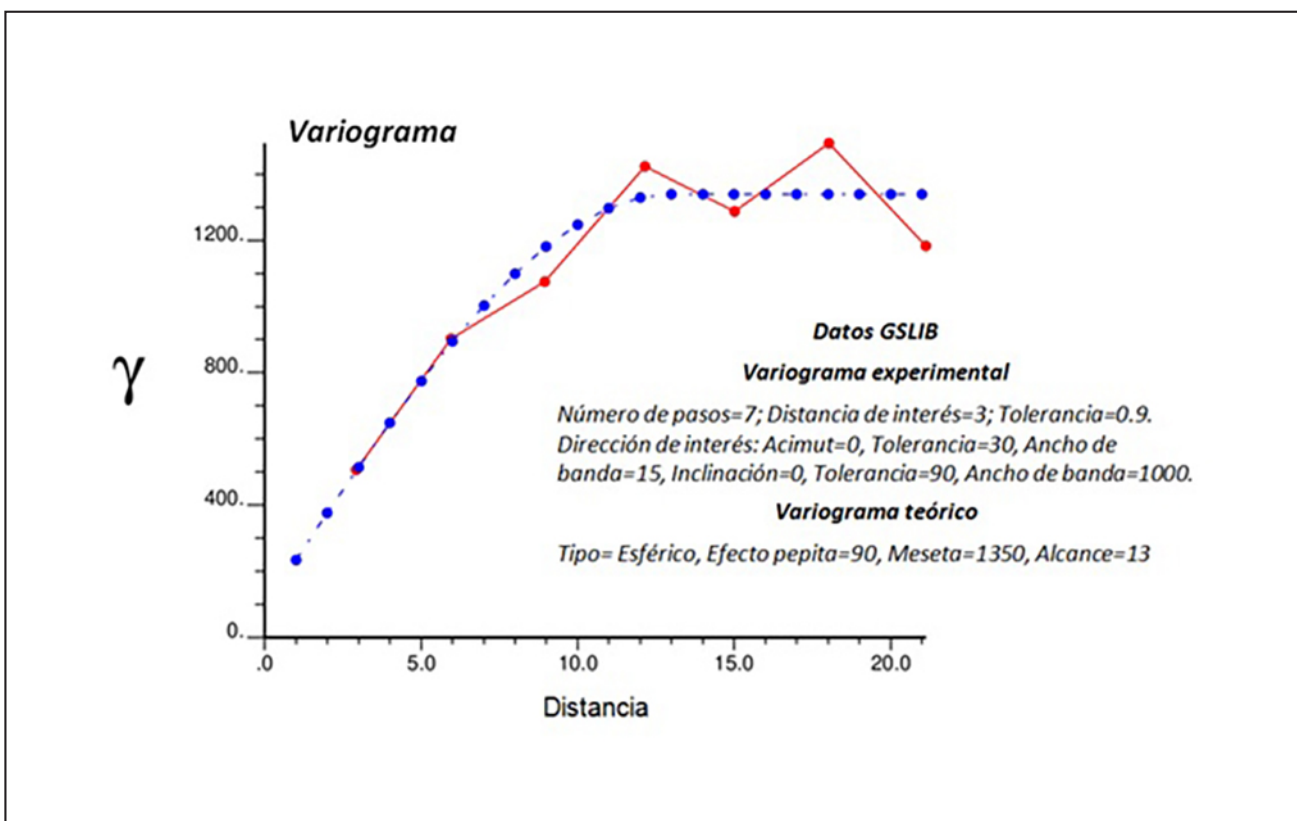


Figura 9. Variograma experimental y teórico en dirección vertical.

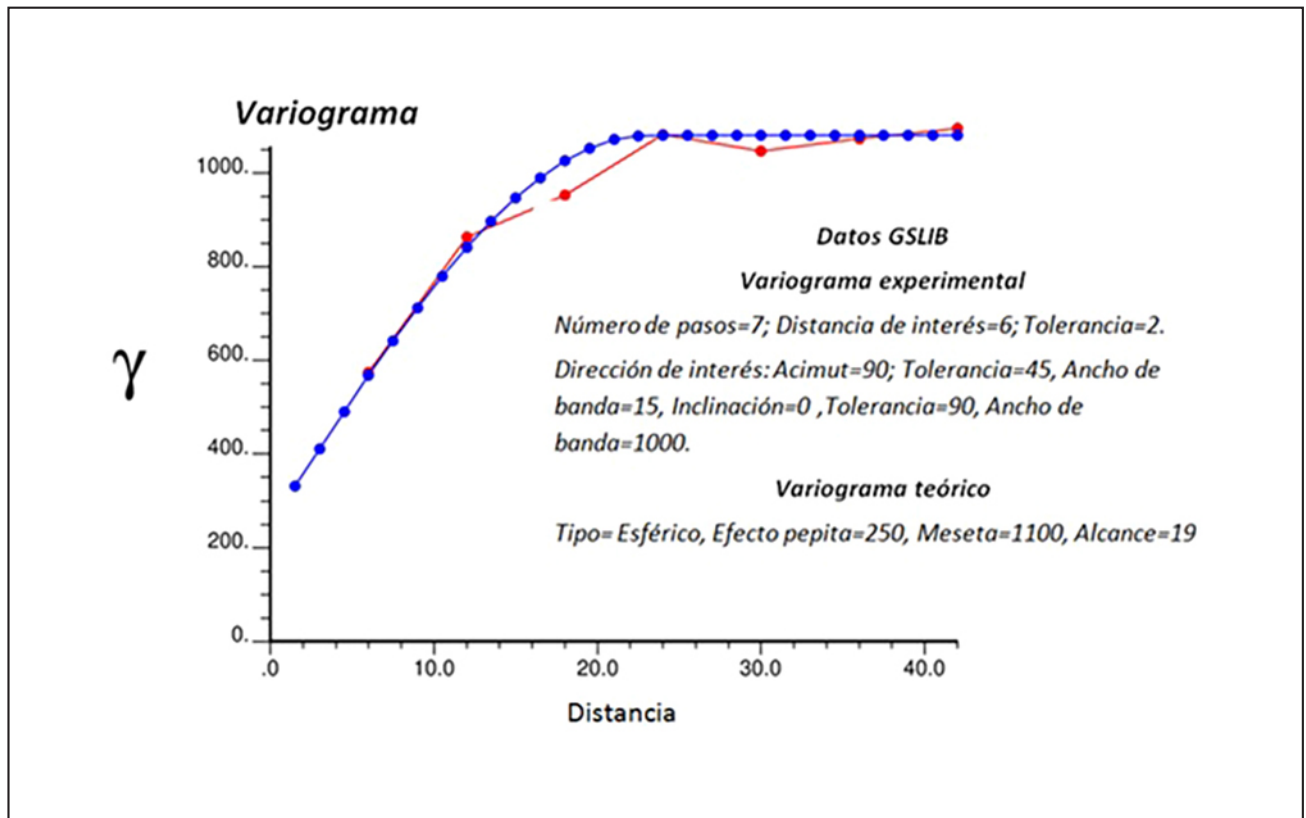


Figura 10. Variograma experimental y teórico en dirección horizontal.

Estimación (kriging)

El kriging es un método de estimación lineal de la variable regionalizada en puntos de un área o volumen, que utiliza un criterio de minimización de la varianza de estimación. Los valores estimados mediante kriging pueden ser utilizados para dibujar mapas de contorno cuando estos son calculados en los nodos de una malla regular. Existen varios algoritmos de kriging que pueden ser usados dependiendo de la información que se tiene en el momento de comenzar con el análisis geoestadístico.

En este trabajo se ha utilizado el método de kriging ordinario, definido como el mejor estimador lineal no sesgado. Es lineal porque los estimados que resultan son combinaciones lineales de los datos disponibles y es no sesgado porque usa un modelo de probabilidad en donde se escogen pesos para los datos cercanos que aseguren que el error sea igual a cero y que la varianza sea minimizada. Este método de estimación se aplicó a la información de los datos de resistividades medidas en el perfil PE5, considerando los parámetros de variabilidad proporcionados por el estudio variográfico (alcances, variabilidades mínima y máxima). De esta forma se obtuvieron valores estimados de resistividad eléctrica en celdas de 2 m x 2 m abarcando toda el área de datos del perfil mencionado. Se utilizó como radio de búsqueda el valor del alcance (12 m) del variograma utilizado.

En la Figura 11 el gráfico A muestra el perfil de resistividades estimadas con kriging ordinario, utilizando el variograma omnidireccional, debido que resulta más conservador en sus parámetros y no hay grandes diferencias con los direccionales. En la misma figura se muestra también el mapa de variancia del kriging (gráfico B) que da una idea de la distribución de la variancia del error de estimación y el gráfico Cuantil-Cuantil

que compara las distribuciones resistividad estimada - resistividad medida (gráfico C) que muestra el alejamiento de la normalidad a partir de valores de resistividad superiores a 100 Ohm.m, límite entre zonas parcialmente saturadas y zonas de baja humedad a seca establecidas por Rodríguez y Mazuelos (2015), compatible con el estado de riego de celdas en la pila.

En la Figura 12 se comparan el perfil de resistividades estimadas en celdas de 2 m x 2 m y medidas con tomografía eléctrica en el perfil PE5 para los valores de referencia límites entre zonas saturadas, parcialmente saturadas y secas.

Los resultados muestran que el modelo obtenido mediante el método geoestadístico ajusta adecuadamente los valores obtenidos por el ensayo geofísico.

ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL PERFIL PE5

A partir del modelo matemático de distribución de resistividades eléctricas se ha procedido a estimar la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el perfil PE5 de la pila de lixiviación.

La relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad eléctrica puede derivarse por analogía entre el flujo de agua y el flujo de corriente eléctrica en un medio poroso. Existen relaciones empíricas o semi-empíricas publicadas para diferentes acuíferos, establecidas a partir de mediciones con geofísica en superficie, en sondeos o en testigos de perforación. Sin embargo, hoy en día no existe una ley física que controle esta relación, ya que en determinados sitios las relaciones resultan con correlación positiva y en otros muestran una correlación negativa, por lo que no termina de entenderse.

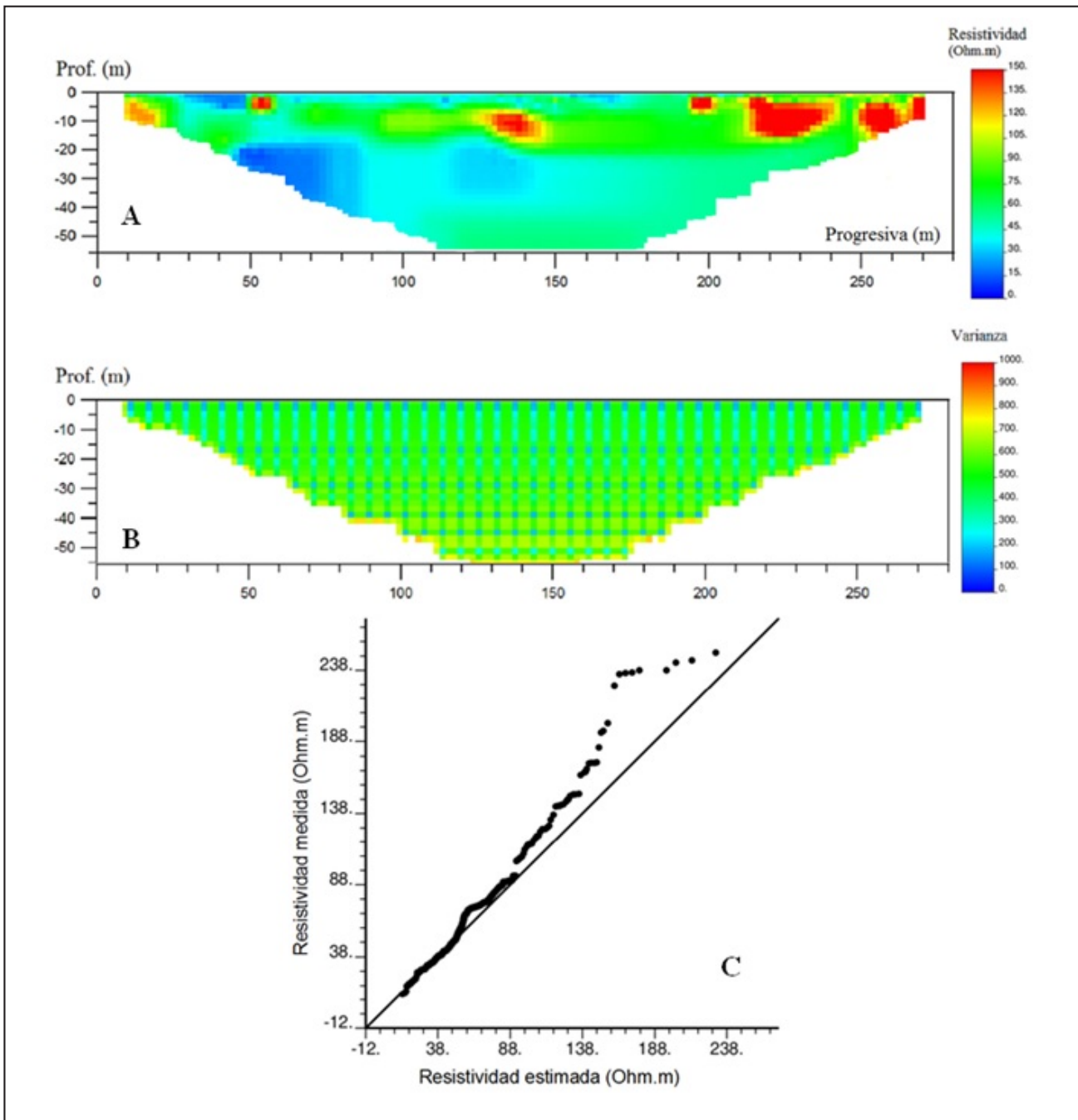


Figura 11. A- Perfil de resistividades estimadas (celdas 2m x 2m); y B- Varianza de la estimación (celdas 2m x 2m); C- Gráfico Cuantil - Cuantil (resistividad estimada - resistividad medida) obtenidos con el método geoestadístico.

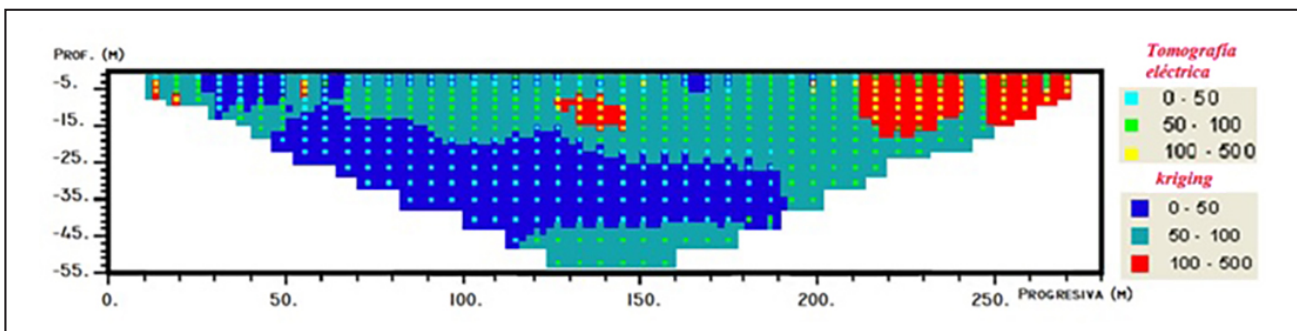


Figura 12. Comparación del perfil de resistividades estimadas en celdas de 2 m x 2 m y medidas con tomografía eléctrica en el perfil PE5 para valores de referencia.

En este trabajo la estimación de la distribución espacial de conductividades hidráulicas en el medio poroso se ha basado en las leyes de Archie (*Archie, 1942*) y en los conceptos generales de la mecánica de suelos no saturados (*Fredlund y Rahardjo, 1993*).

Leyes de Archie

En la mayoría de los minerales, excepto en arcilla saturada, minerales metálicos y grafito, la resistividad eléctrica es alta, y por lo tanto, la corriente eléctrica fluye principalmente a través del agua intersticial contenida en los poros del mineral. De acuerdo con *Archie (1942)*, la resistividad de un material (roca o suelo) saturado con agua salada, sin contenido de arcilla, puede describirse por:

$$R_o = R_w F_i \quad (1)$$

Dónde,

R_o = resistividad de la roca o suelo saturada de agua,

R_w = resistividad del agua intersticial,

F_i = factor de formación intrínseco.

El factor de formación intrínseco (F_i) combina todas las propiedades del material que influyen sobre el flujo de corriente eléctrica: porosidad, estructura porosa y cementación diagenética. Se utiliza para la evaluación petrofísica de depósitos, acuíferos y sitios de ingeniería (*Salem, 2012*), y se puede expresar por:

$$F_i = a \phi^{-m} \quad (2)$$

Dónde,

ϕ = porosidad,

a = parámetro asociado al medio.

m = exponente de la porosidad, factor de forma o grado de cementación,

La ecuación 2 se conoce como primera ley de Archie, es válida en formaciones completamente saturadas y sin contenido de arcillas, donde los granos del material son aislantes perfectos.

El factor asociado con el medio a , es un indicador de la geometría de los poros en un medio poroso. Este factor generalmente disminuye al aumentar la compactación, consolidación y edad de los sedimentos o rocas. Desde el punto de vista físico, a debería ser igual a 1 ya que cuando $\phi = 1$ resulta $F_i = 1$ en la ecuación 1. Sin embargo, su valor en muchos casos se aparta del valor comúnmente asumido de uno.

El factor de cementación m exhibe amplias variaciones en función de la geometría de los poros, compactación, composición mineral y propiedades aislantes de la cementación. El aumento en el área superficial específica del material por mayor contenido de finos (arenas, limo, arcillas) o la mayor angularidad (menos esfericidad) de los granos resulta en valores más altos de m . *Archie (1942)* indica valores de m entre 1,3 y 3. El rango general de m dado en la literatura varía generalmente entre 1 para rocas fracturadas y 5 para rocas bien consolidadas y altamente compactadas.

En la Tabla 1 se han indicado rangos para los parámetros a y m reportados por diversos autores (*Khalil y Monterio Santos, 2009*).

Tabla 1. Rango de los parámetros a y m de la primera Ley de Archie.

Litología	a	m	Autor
Areniscas	0,47 - 1,8	1,64 - 2,23	Hill and Milburn (1956)
	0,62 - 1,65	1,3 - 2,15	Carothers (1968)
	1,0 - 4,0	0,57 - 1,85	Porte and Carothers (1970)
	0,48 - 4,31	1,2 - 2,21	Timur et al. (1972)
	0,004 - 17,7	0,02 - 5,67	Gomez-Rivero (1977)
Carbonatos	0,73 - 2,30	1,64 - 2,1	Hill and Milburn (1956)
	0,45 - 1,25	1,78 - 2,38	Carothers (1968)
	0,33 - 78,0	0,39 - 2,63	Gomez-Rivero (1977)
	0,35 - 0,8	1,7 - 2,3	Schon (1983)

En medios parcialmente saturados el grado de saturación S_w incide fuertemente sobre la conductividad hidráulica del material, ya que los cambios de S_w producen cambios en la permeabilidad relativa del material, y éste a su vez sobre la conductividad hidráulica (*Delahaye et al., 2016*). La consideración del grado de saturación para medios parcialmente saturados se expresa por la segunda ley de Archie:

$$F_a = \frac{R_t}{R_w} = a \phi^{-m} S_w^{-n} \quad (3)$$

Donde, F_a es el factor de formación aparente, R_t es la resistividad de la formación, R_w es la resistividad del agua de poro, ϕ es la porosidad, S_w es el grado de saturación, a y m son parámetros relacionados con el tipo de roca, y n es el índice de saturación (generalmente n varía entre 1,8 a 2). En condiciones de Archie, arena limpia y completamente saturada de agua salada, $F_a = F_i$.

La aplicación de la ecuación 3 en el perfil PE5, para los valores de resistividad (R_t) estimados con el método geostatístico y parámetros $R_w = 1,19$ Ohm.m (resistividad de la solución de cianuro utilizada en el riego de la pila), $a = 1$ y $m = n = 2$ (valores adoptados para el mineral triturado de la pila), han permitido estimar en dicho perfil la distribución del contenido volumétrico de líquido ($\theta_w = \phi \cdot S_w$), la porosidad (ϕ), el grado de saturación (S_w) y la permeabilidad saturada (K_{ws}).

En la derivación de la porosidad ϕ y del grado de saturación S_w se ha considerado que dichas variables cambian inversamente (*Khalil y Monterio Santos, 2009*). Además, considerando que la tasa de riego de la pila es pequeña ($q = 12$ l/(h.m²) = $3,33 \cdot 10^{-6}$ m/s) y mucho menor que la permeabilidad saturada del mineral (valores de referencia: $K_{ws0} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m/s para $\phi = 0,38$, se ha considerado válida la hipótesis de que en estas condiciones el flujo de líquido se realiza principalmente por la fracción fina del mineral, es decir, por las zonas con mayor contenido de humedad θ_w (*Delahaye et al., 2016*).

Mecánica de suelos no saturados

Conocido el campo de permeabilidades saturadas se puede determinar el movimiento del flujo de solución de riego en el

interior de la pila de lixiviación utilizando el marco teórico que provee la mecánica de suelos no saturados (*Fredlund and Rahardjo, 1993*).

El líquido se mueve a través del medio poroso de acuerdo con la ley de Darcy:

$$\mathbf{v}_l = -(\mathbf{K}_l / \gamma_l)(\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (4)$$

γ_l es el peso específico del líquido. $K_l = K k_{rl} (\rho_l \mathbf{g} / \mu_l)$ es el tensor permeabilidad al líquido. μ_l es la viscosidad dinámica del líquido. \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad. El tensor permeabilidad intrínseca, K , depende de la estructura porosa del terreno y está dado por:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad (5)$$

donde K_0 es la permeabilidad intrínseca correspondiente a ϕ_0 (porosidad de referencia). k_{rl} es la permeabilidad relativa al líquido, la cual controla la variación de la permeabilidad en régimen no saturado. En condiciones saturadas, la permeabilidad al líquido alcanza el valor de la permeabilidad saturada, $K_l = K_{ws}$.

Estimación de la distribución del contenido volumétrico de líquido ($\theta_w = \phi S_w$), porosidad (ϕ), grado de saturación (S_w) y permeabilidad saturada (K_{ws}) en el perfil PE5

La relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad medida con métodos geofísicos en distintos tipos de acuíferos resulta generalmente empírica o semi-empírica. En algunos casos esta relación tiene una correlación positiva y negativa en otros, no existiendo en la actualidad una ley potencialmente física que controle dicha relación, la que tampoco alcanza a comprenderse en forma completa.

Khalil y Monterio Santos (2009) analizan el efecto del grado de saturación en la relación entre la conductividad hidráulica y la resistividad aparente del acuífero mediante un análisis numérico de la segunda ley de Archie y la ecuación de Kozeny-Carman. En el estudio establecen tres relaciones no lineales características entre la conductividad hidráulica y la resistividad global dependiendo del grado de saturación:

1. Relación potencial inversa en acuíferos completamente saturados y cuando la porosidad es igual al grado de saturación.
2. Relación potencial inversa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es superior al 50% y superior a la porosidad.
3. Relación potencial directa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad.

Estos resultados son compatibles con algunas relaciones de escala de campo. La coincidencia entre estudios de casos y modelos analíticos muestra buenos resultados, dependiendo de la calidad de los datos y las técnicas de medición.

Para la pila de Gualcamayo se ha considerado la semejanza con el tercer caso dada las condiciones de saturación de la pila, estableciendo la siguiente relación potencial directa entre la porosidad (ϕ) y la resistividad eléctrica medida R_t en el perfil PE5:

$$Rt = 1083.94 \phi^{1/0.312} \quad (6)$$

Esta relación fue obtenida a partir de:

- a) Las propiedades de referencia del material apilado, $\phi_0 = 0,38$, $\rho_s = 2,5 \text{ t/m}^3$, $w = 9,8\%$, $K_{ws} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ y las mediciones de conductividad - humedad realizadas en una celda piloto de la pila utilizando sensores de conductividad eléctrica, bajo condiciones normales de operación. (*Onorato, 2019*).
- b) Los ensayos geofísicos: considerando valores de resistividad límite entre zona saturada y zona muy húmeda (0 a 50 Ohm.m), zona muy húmeda y zona de baja humedad (50 a 100 Ohm.m) y de zona de baja humedad a zona seca (100 y 500 Ohm.m) (*Rodríguez y Mazuelos, 2015*).
- c) Relación potencial directa en acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad (*Khalil y Monterio Santos, 2009*).

De la segunda ley de Archie (ecuación 3):

$$\phi^{-m} S_w^{-n} = \frac{R_t}{R_w a} \quad (7)$$

Para $a = 1$, $m = n = 2$ y $\theta_w = \phi S_w$ resulta:

$$\theta_w = \phi S_w = \left(\frac{R_w a}{R_t} \right)^{1/n} = \left(\frac{1.19}{R_t} \right)^{1/2} \quad (8)$$

De la ecuación (6) y (8):

$$S_w = \theta_w / \phi (R_t) \quad (9)$$

De la ecuación 5 (modelo de Kozeny) y los valores de referencia ($K_{ws0} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ para $\phi_0 = 0,38$), resulta la relación permeabilidad saturada vs. resistividad.

$$K_{ws} = K_{ws0} \frac{\phi(Rt)^3}{(1-\phi(Rt))^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (10)$$

En la Figura 13 se muestra la relación adoptada para el perfil PE5 y la relación propuesta por *Khalil y Monterio Santos (2009)* para acuíferos no saturados y cuando el grado de saturación es inferior al 50% e inferior a la porosidad (tercer caso).

En la Figura 14 se han representado las relaciones de ϕ , θ_w , S_w y K_{ws} vs. R_t resultantes para el perfil PE5.

Análisis de resultados

Los resultados para el contenido volumétrico de líquido ($\theta_w = \phi S_w$), porosidad (ϕ), grado de saturación (S_w) y conductividad eléctrica saturada ($K_{ws} \cdot 10^{-3}$) se muestran en las Figuras 15, 16, 17 y 18, respectivamente. La Figura 15 muestra que los contenidos de humedad θ_w mayores se corresponden con valores menores de resistividades R_t estimadas con kriging (Figura 11).

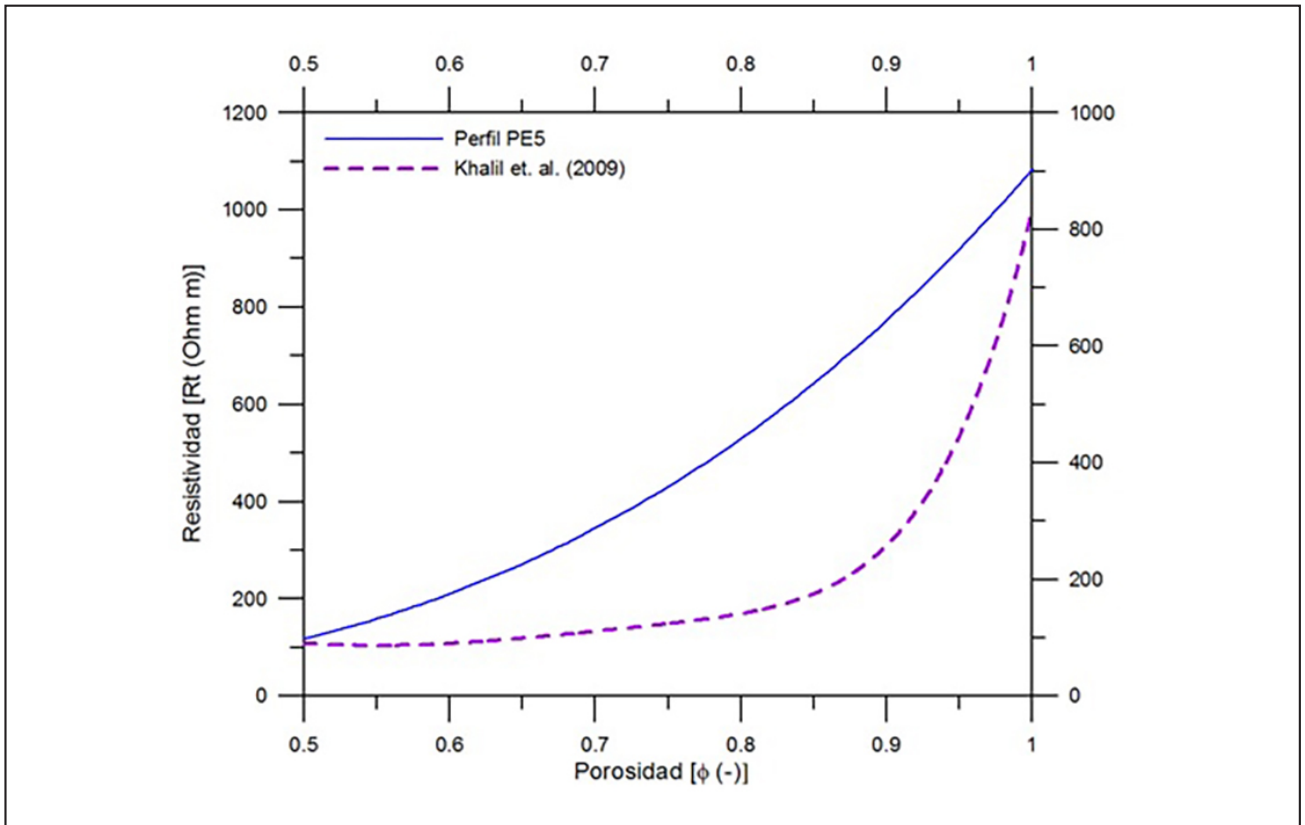


Figura 13. Relación resistividad vs. porosidad para el perfil PE5.

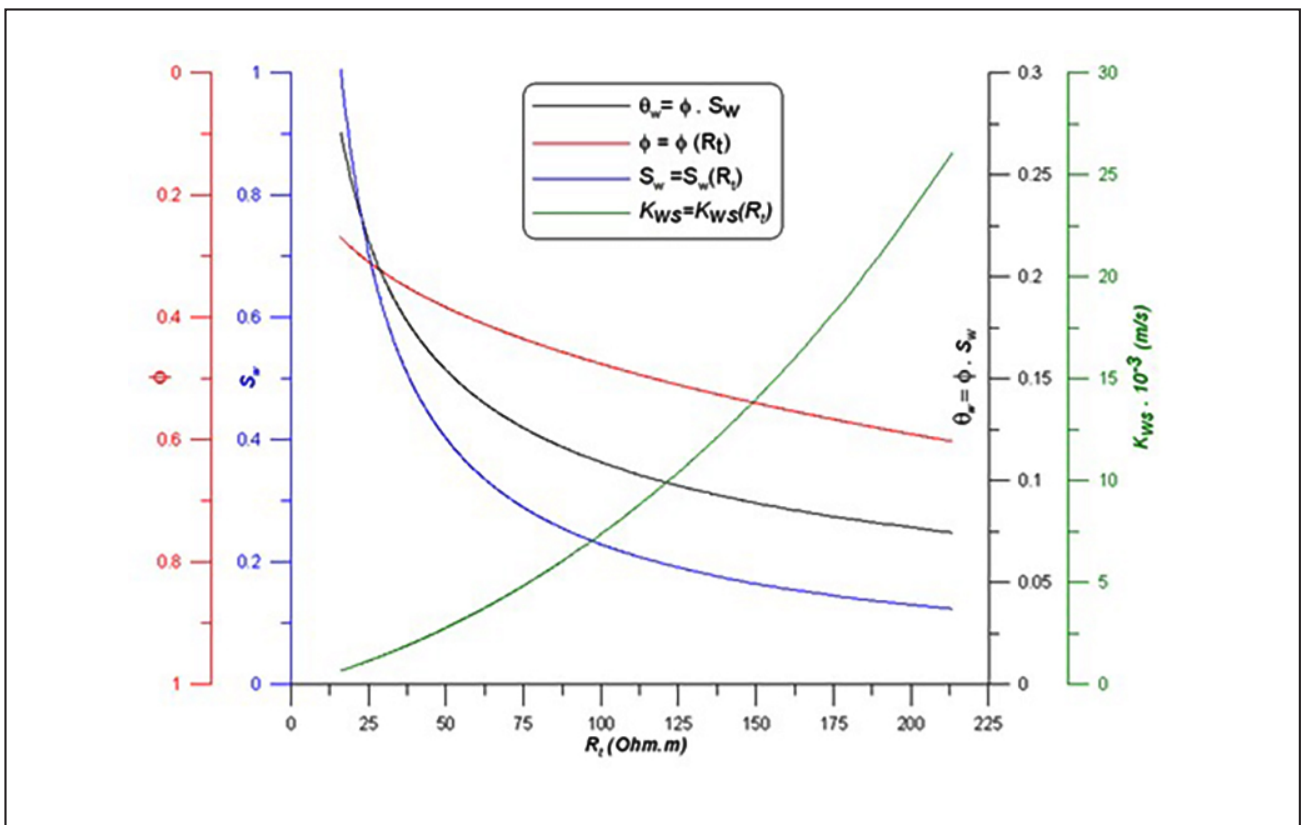


Figura 14. Relaciones ϕ , θ_w , S_w y K_{ws} vs. R_t para el perfil PE5.

La distribución de porosidades de la Figura 16 muestra que valores mayores de ϕ se corresponden con valores mayores de resistividades R_t estimadas con kriging (relación directa). La distribución del grado de saturación S_w de la Figura 17 muestra correspondencia directa entre valores mayores de S_w con valores mayores del contenido volumétrico de agua θ_w y a

su vez con valores menores de resistividades R_t estimadas con kriging. Finalmente, la Figura 18 muestra la distribución de la permeabilidad saturada K_{ws} en el perfil PE5, donde se aprecia una correspondencia directa entre valores K_{ws} con valores de porosidad ϕ y de resistividad R_t así como una correspondencia inversa entre valores de K_{ws} con valores de bajos de θ_w y S_w .

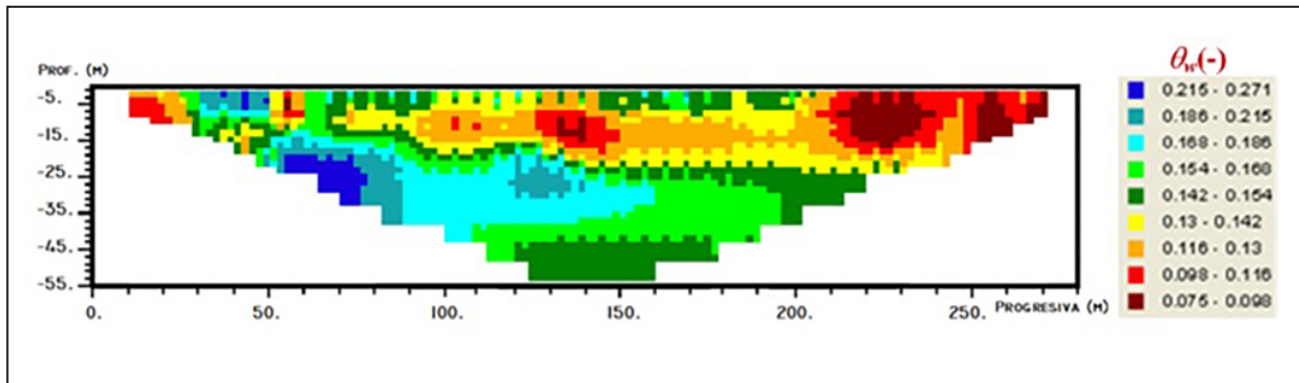


Figura 15. Distribución del contenido volumétrico de líquido en el perfil PE5.

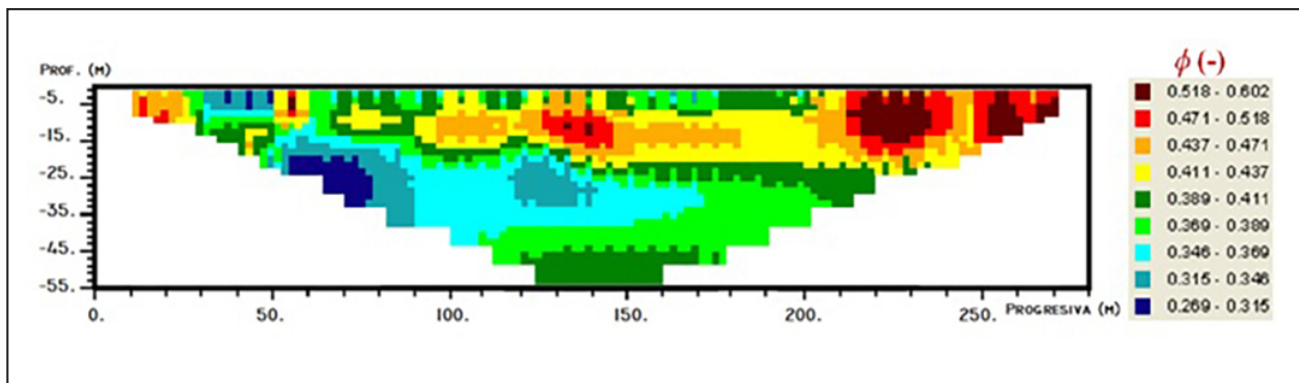


Figura 16. Distribución de la porosidad en el perfil PE5.

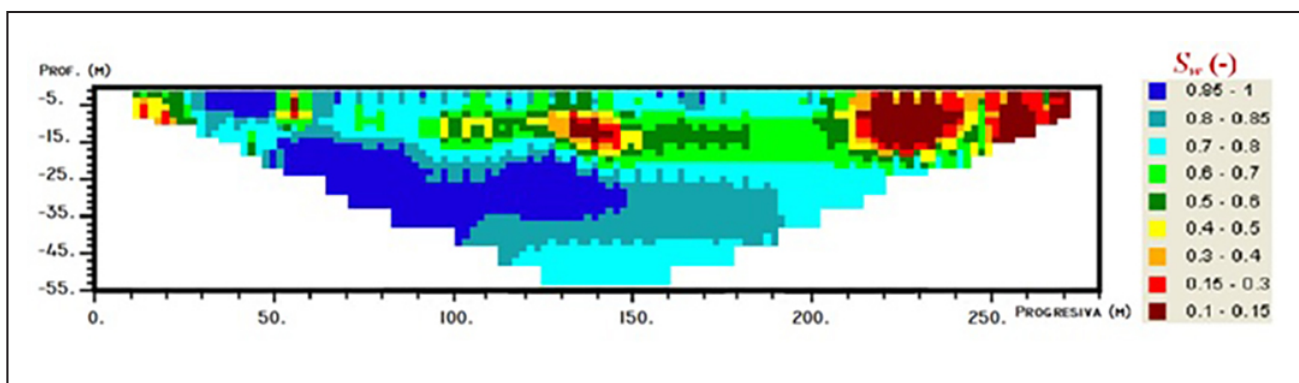


Figura 17. Distribución del grado de saturación en el Perfil PE5.

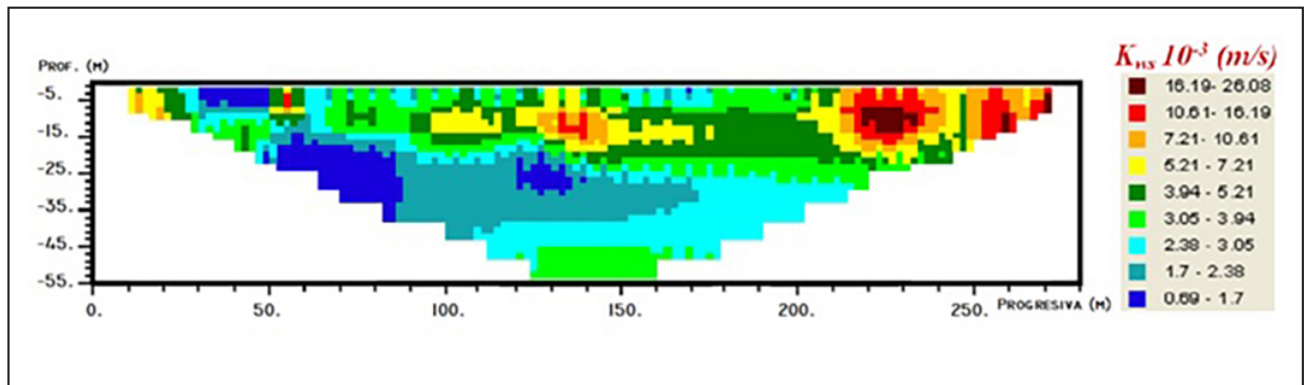


Figura 18. Distribución de la conductividad hidráulica saturada en el perfil PE5.

CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas geoestadísticas sobre la base de mediciones de resistividades realizadas en el terreno con tomografía eléctrica abre las puertas para abordar problemas de drenaje en pilas de lixiviación, ya que permite realizar estudios con un carácter más cuantitativo, lo que ayuda a reducir la incertidumbre. El método geoestadístico aplicado a perfiles geofísicos de la pila de lixiviación de Gualcamayo muestra que los esquemas de clasificación de variables basados en mediciones de la dispersión son más confiables, pues reflejan la cantidad y calidad de la información empleada en la evaluación. Los resultados muestran sectores con diferentes condiciones de riego en la pila con un alto grado de seguridad. Este estudio refuerza la opinión de muchos autores que recomiendan a la Geoestadística como procedimiento válido y confiable en el proceso de categorización y clasificación de variables regionalizadas.

Los gráficos resultantes dan una idea de la distribución de los valores del contenido volumétrico de líquido, porosidad, grado de saturación y de la conductividad hidráulica en la zona de estudio. La obtención de la distribución de conductividades hidráulicas en el perfil PE5, derivada a partir del modelo de resistividades obtenido aplicando el método geoestadístico, las leyes de Archie y conceptos de la mecánica de los suelos no

saturados, conduce a una mejor comprensión del flujo de líquido en el interior de la pila de Gualcamayo. Extendiendo el estudio a los otros perfiles geofísicos es posible abarcar todo el volumen de la pila. Así se puede distinguir sectores con valores de resistividad altos correspondiente a sectores con poco o riego nulo, y sectores con valores de resistividad bajos correspondiente a sectores con mayor riego.

La existencia de sectores de la pila bajo diferentes condiciones de riego del mineral puede conducir al desarrollo de flujos de líquido heterogéneos en el interior de la pila. Las fluctuaciones de la estructura espacial de la permeabilidad del mineral controlan las vías de circulación del líquido y la magnitud de los flujos. Este aspecto resulta de suma importancia ya que utilizando el marco de la mecánica de suelos no saturados se pueden determinar las condiciones de flujo en el interior de la pila y derivar el rendimiento de la operación extractiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Mineras, al Departamento de Ingeniería de Minas y al CICITCA de la Universidad Nacional de San Juan, el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARCHIE G.E. 1942.
The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.
American Institute of Mineral and Metal Engineering. Technical publication, 1442, Petroleum Technology, pp. 8-13.
- CAROTHERS J.E. 1968.
A statistical study of the formation factor relation.
Log Anal 9(5):13-20.
- DAVID, MICHEL.1977.
Geoestatistical Ore Reserve Estimation (Developments in Geomathematics 2).
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- DELAHAYE, C.H., BERENQUER, T.A, GATICA, G. Y BILBAO, M.A. 2016.
Efecto de la permeabilidad del mineral sobre las condiciones de flujo no saturado en pilas de lixiviación.
Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. XXIII CAMSIG, 9-11 noviembre 2016, Santa Fe, Argentina. 504-521.
- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A. G.1992.
Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide.
Oxford University Press, New York.

- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A. G. 2011.
Geostatistical Software LIBrary "WinGSLIB".
Versión 1.5.8. Statios LLC - Software and Services, www.statios.com.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H.1993.
Soil Mechanics for Unsaturated Soils.
John Wiley & Sons, Inc.
- GOMEZ-RIVERO O. 1977.
Some considerations about the possible use of the parameters α and m as a formation evaluation tool through well logs.
Trans SPWLA 18th Ann Logging Symp: J 1-24.
- HILL, H.J. AND MILBURN, J.D. 1956.
Effect of clay and water salinity on electrochemical behaviour of reservoir rocks.
Trans. AIME, 207: 65-72.
- JOURNAL, A.G. Y C.H. J. HUIJBREGTS. 1978.
Mining Geostatistics.
Academics Press, New York.
- KHALIL, M.A. & MONTERIO SANTOS, F. A.2009.
Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity-Hydraulic Conductivity Relationship.
Chapter 2.Earth and Planetary Sciences, Geology and Geophysics, Developments in Hydraulic Conductivity Research, Book edited by Oagile Dikinya, ISBN 978-953-307-470-2, www.intechopen.com.
- MCBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. AND BURGESS, T.M. 1981.
The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I.
Computers and Geosciences. 7(4): 331-334.
- ONORATO, M. 2019.
Comportamiento THM y metalúrgico de pilas de lixiviación de minerales auríferos.
Tesis de Maestría. Maestría en Metalurgia Extractiva. Versión en evaluación. Universidad Nacional de San Juan.
- PORTER, C.R. AND CAROTHERS, J.E. 1970.
Formation factor-porosity relation derived from well log data.
Trans. SPWLA 11th Ann. Logging Symp: 1-19.
- RODRÍGUEZ, A. Y MAZUELOS, O. 2015.
Geofísica geotécnica a partir de tomografías eléctricas y MASW.
Empresa Minas Argentinas - Yamana Gold. Mina Gualcamayo. San Juan. Argentina. Informe Técnico - Estudios Geofísicos GEOAR S.R.L., Rev. 0.
- SALEM, H.S. 2001.
Determination of Porosity, Formation Resistivity Factor, Archie Cementation Factor, and Pore Geometry Factor for a Glacial Aquifer.
Energy Sources, 23:6, 589-596. DOI: 10.1080/00908310152125238.
- SCHON, J. 1983.
Petrophysik.
Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen: Akademie-Verlag, Berlin, 405 pp.
- THIEL, R. & SMITH, M. 2004.
State of the practice review of heap leach pad design issues.
Geotextiles and Geomembranes, 22(6), 555 - 568.
- TIMUR, A., HEMKINS, W.B. AND WORTHINGTON, A.E. 1972.
Porosity and pressure dependence of formation resistivity factor for sandstones.
Trans. CWLS 4th Formation Evaluation Symp., 30pp.
- WACKERNAGEL. H. 1995.
Multivariate Geostatistics.
An Introduction with Applications. Springer-Verlag, Berlin.