



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EVALUACION GEOESTADISTICA DEL PROYECTO
MINERO CERRO DE SAN PEDRO, S. L. P.

TESIS

Que para obtener el Título de:

INGENIERO GEOLOGO

Presenta:

RICARDO GARCIA COLLAZO

MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | I |
| I. GENERALIDADES..... | 1 |
| I.1 Localización y vías de comunicación..... | 1 |
| I.2 Fisiografía..... | 1 |
| I.3 Geomorfología..... | 1 |
| I.4 Orografía..... | 1 |
| I.5 Hidrografía..... | 4 |
| I.6 Clima y vegetación..... | 4 |
| I.7 Actividades económicas..... | 4 |
| I.8 Historia..... | 5 |
| I.9 Estudios previos..... | 8 |
| II. INFORMACION GEOLOGICA..... | 10 |
| II.1 Marco geológico regional..... | 10 |
| II.2 Geología local..... | 10 |
| II.3 Geología histórica..... | 14 |
| II.4 Yacimientos minerales..... | 15 |
| II.5 Origen de la mineralización..... | 16 |
| III. ANALISIS DE LA INFORMACION..... | 17 |
| III.1 Introducción..... | 17 |
| III.2 Objetivos..... | 17 |
| III.3 Evaluación de la información..... | 18 |
| III.4 Metodología..... | 18 |
| IV. ANALISIS ESTADISTICO..... | 25 |
| IV.1 Introducción..... | 25 |
| IV.2 Conceptos básicos..... | 26 |
| IV.3 Análisis estadístico..... | 27 |

| | |
|---|----|
| V. EVALUACION GEOESTADISTICA..... | 36 |
| V.1 Introducción..... | 36 |
| V.2 Análisis estructural..... | 36 |
| V.2.1. Conceptos básicos..... | 37 |
| V.2.2. Construcción y análisis de semivariograma..... | 40 |
| V.3 Krigeage..... | 45 |
| V.3.1 Introducción..... | 45 |
| V.3.2 Conceptos básicos..... | 45 |
| V.3.3 Cálculo de reservas..... | 47 |
| V.4 Distribución geográfica..... | 57 |
| V.4.1 Valores unitarios..... | 57 |
| V.4.2 Distribución geográfica de los valores de oro y plata..... | 57 |
| V.5 Estrategias de exploración..... | 60 |
| V.5.1 Introducción..... | 60 |
| V.5.2 Diseño de las estrategias de exploración..... | 61 |
| VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 69 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 72 |
| ANEXOS..... | 76 |

RESUMEN

El Proyecto Minero "Cerro de San Pedro" se localiza en el poblado del mismo nombre, a 18 km en línea recta al noreste de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P.

La geología del depósito consiste de rocas calcáreas de las formaciones Tamaulipas Inferior y Cuesta del Cura, intrusionadas por un dique con rumbo NW-SE y echado al poniente al cual está asociada la mineralización del área.

La mineralización de interés para la Compañía Fresnillo, la cual está llevando actualmente los trabajos de exploración en el área, consiste de mineralización diseminada de Au-Ag en calizas y diseminada y en vetillas de Au-Ag en el intrusivo.

Los objetivos del presente fueron realizar un análisis estadístico de cada una de las mineralizaciones presentes: Au, Ag, Pb, Zn, y Cu; demostrar la aplicabilidad de la Geostatística al depósito, y en caso afirmativo evaluar las reservas minerales utilizando la técnica del kriging y diseñar estrategias de exploración tanto para el área explorada como para una área nueva del depósito.

Cada una de las variables estudiadas, ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE presentan una distribución estadística lognormal; asimismo la variabilidad espacial de cada una de ellas está caracterizada por un modelo geostatístico del tipo esférico.

La mineralización de Au-Ag resultó ser atractiva económicamente pero no tanto la mineralización de Pb-Zn-Cu.

El cálculo de reservas minerales se efectuó sólo para la mineralización que resultó atractiva, la de Au-Ag, empleando el método geostatístico denominado kriging lognormal.

Se obtuvo la distribución geográfica de las leyes combinadas de oro y plata convertidas a valores monetarios.

Con la información disponible se diseñaron estrategias de exploración tanto para el área ya explorada en la cual se recomendaron algunos barrenos adicionales, como para una área nueva del depósito, para la cual se diseñaron estrategias de configuración cuadrangular y triangular.

I. GENERALIDADES

I.1 LOCALIZACION Y VIAS DE COMUNICACION.

El Proyecto Minero "Cerro de San Pedro" se localiza en el poblado del mismo nombre, que es cabecera municipal en el Estado de San Luis Potosí. Este poblado se ubica aproximadamente a 18 km en línea recta al N67°30'E de la ciudad de San Luis Potosí.

El acceso desde la ciudad de San Luis Potosí, se logra tomando la Carretera Federal No. 86 que va a Ciudad Valles, a la altura del km 8 se toma un camino pavimentado que pasa por el poblado Los Gómez y el Real del Potosí hasta llegar al poblado de Cerro de San Pedro (Fig.1).

I.2 FISIOGRAFIA.

De acuerdo con Erwin Raisz (1959), el área de estudio se encuentra situada en la Mesa Central y está limitada al oriente por la Subprovincia de Sierras Bajas de la Sierra Madre Oriental y hacia el norte y poniente del área se prolonga la Mesa Central (Fig.2).

I.3 GEOMORFOLOGIA.

El área presenta una topografía poco accidentada, de cerros redondeados y de poca altura, constituidos por sedimentos del Cretácico sumamente plegados. Algunos de estos cerros se encuentran coronados por mesetas de flujos volcánicos.

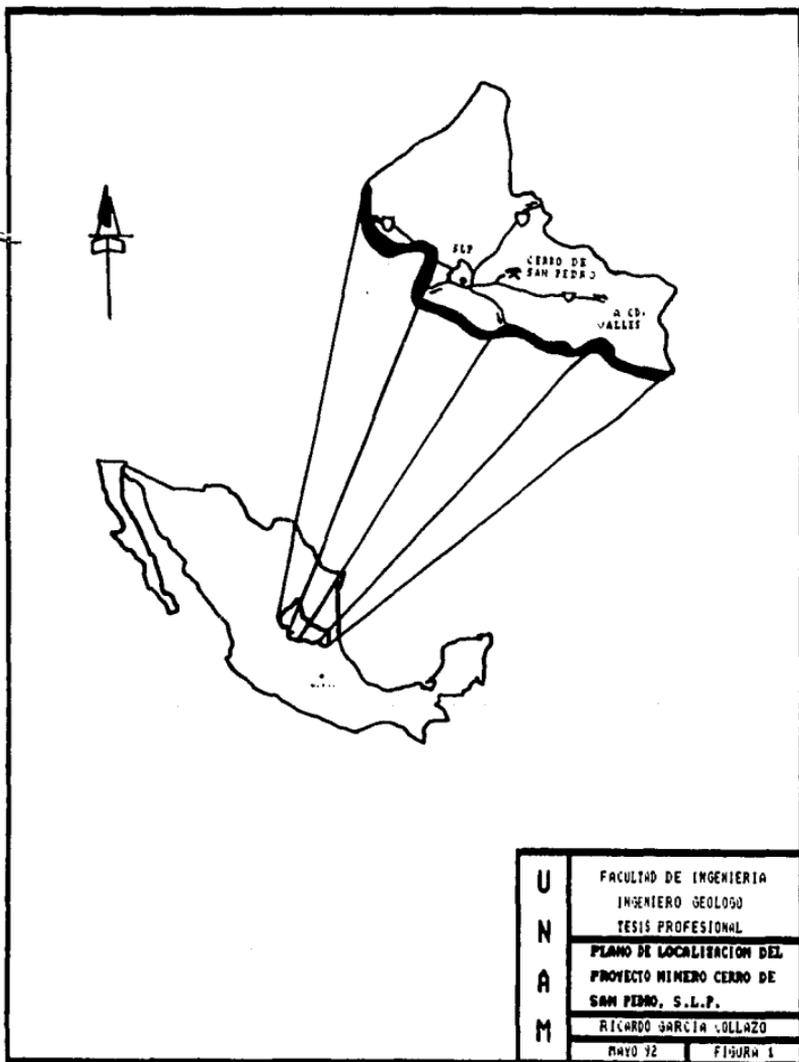
El cuerpo igneo por ser el menos resistente a la erosión ocupa las partes bajas, influenciando al relieve y al patrón de drenaje.

Por los rasgos anteriormente descritos, se define que el área se encuentra en un estado de madurez temprana dentro del ciclo geomorfológico.

Hacia el oeste se extiende una enorme planicie sobre la cual se encuentra asentada la ciudad de San Luis Potosí.

I.4 OROGRAFIA.

Prácticamente todo el Municipio de Cerro de San Pedro se encuentra enclavado en una zona montañosa, destacando por su elevación el Cerro La Reposo, que se encuentra a 2,356 m.s.n.m., otros cerros de elevación considerable son el Cerro de San Pedro con 2,280 m.s.n.m., el Cerro Portezuelo, Lobo, Chiquihuitillo, Las Cruces y El Ranchito.



I.5 HIDROGRAFIA.

El patrón de drenaje en la zona es de tipo dendrítico. Los arroyos son de flujo intermitente llevando agua solamente en época de lluvias. En general dentro del área existen pocas corrientes fluviales, una de las más importantes es el Arroyo San Pedro el cual es alimentado por otros arroyos como son el Arroyo San Niciolás, el Arroyo Jesús María y el Arroyo Los Méndez. El Arroyo San Pedro como otras corrientes fluye hacia el poniente, hacia la cuenca de San Luis Potosí, donde desaparecen al infiltrarse en el terreno.

I.6 CLIMA Y VEGETACION.

El clima que corresponde a esta región, es del tipo seco estepario con temperatura media anual de 16.8°C , con una máxima absoluta de 35°C y una mínima absoluta de 7°C . La temporada cálida comprende los meses de mayo a septiembre y el período frío de octubre a abril.

La temporada de lluvias generalmente se inicia en el verano. Las lluvias son muy escasas e irregulares, siendo estas torrenciales.

El área del Municipio está cubierta por una población vegetal típica de las zonas templadas áridas de mayor extensión, tales como: matorral micrófilo, matorral espinoso, nopales y crasi-rosulizal.

I.7 ACTIVIDADES ECONOMICAS.

El Municipio de Cerro de San Pedro contaba con una población de 1,903 habitantes en 1988.

Del total de la población económicamente activa, el 40.07% se ocupa en el sector primario, el sector secundario ocupa el 34.35% y el sector terciario aporta el 8.25%, el resto de la población se ocupa en actividades insuficientemente especificadas y representa el 17.33%.

En la agricultura, la población se dedica al cultivo de maíz y frijol. En la ganadería, se dedica a la cría de ganado bovino, ovino, caprino y equino. En el comercio, la principal área del mercado se localiza en la cabecera municipal y Portezuelos, el cual cuenta con un pequeño mercado de abastos. Las actividades turísticas son escasas.

La infraestructura para atender la población en edad escolar está compuesta por una preprimaria, siete primarias, cinco telesecundarias y una secundaria.

En lo que respecta a la recreación y al deporte, se cuenta con un teatro y canchas de basquetbol, beisbol y volibol.

El Municipio carece de instituciones médicas y cuando lo requiere se solicita ayuda al Municipio de Soledad Díez Gutiérrez o a la capital del Estado.

Este Municipio tiene dentro de su territorio únicamente caminos rurales de terracería. El servicio de correo es suministrado a la población en la cabecera municipal por medio de una agencia postal. El servicio de teléfono se ofrece a través de una caseta en el poblado de Portezuelo. Existe una línea de autobuses locales que cubren la ruta de San Luis Potosí a Portezuelo.

El Municipio ofrece a los habitantes de la cabecera municipal y a los de algunas rancherías, servicio de electrificación, panteones, seguridad pública y agua potable.

I.8 HISTORIA.

La ciudad de San Luis Potosí debe su fundación al descubrimiento del Mineral de Cerro de San Pedro, considerado como uno de los minerales más ricos hasta entonces conocidos en la Nueva España.

La fecha precisa del descubrimiento del Mineral se desconoce. El ingeniero José María Gómez del Campo en su documento "Noticia del Mineral de San Pedro" (1878), señala el año de 1583 como fecha del descubrimiento del rico criadero de oro y plata del Cerro de San Pedro por Don Pedro Iriarte. El mismo autor, en otro escrito "Noticia del Mineral de San Pedro" (1881), señala que Antonio Lorenzana en el año de 1568 ya hacía mención de las minas de este Mineral, y que el descubrimiento fue hecho por unos abigeos perseguidos por la justicia y que al refugiarse en la Sierra de San Pedro hicieron fuego, fundiéndose el plomo y haciendo su aparición a la vista la plata y el oro. En la época colonial no se perseguía a los criminales que descubrían criaderos metálicos y con esa confianza los abigeos dieron aviso del hallazgo.

Otros documentos coinciden en señalar como fecha del descubrimiento el día 4 de Marzo de 1592 cuando el Capitán Miguel Caldera, informado por Fray Diego de la Magdalena de la existencia de oro y plata en los cerros ubicados al oriente del poblado de San Luis, comisionó a un grupo de españoles para localizar el sitio y catear y tomar minas. Y que fue Don Pedro de Anda quien dió a este Mineral el nombre de Cerro del Señor San Pedro.

La escasez de agua en el Mineral de Cerro de San Pedro fue un obstáculo para el tratamiento del mineral extraído, por lo que en el poblado de San Luis y en otros puntos cercanos al Mineral se establecieron haciendas de beneficio con más de 100 hornos de fundición. Es por esto que se confundía al Mineral con el poblado de San Luis.

Una vez consumada la paz con los indios guachichilos el pueblo

El Municipio carece de instituciones médicas y cuando lo requiere se solicita ayuda al Municipio de Soledad Díez Gutiérrez o a la capital del Estado.

Este Municipio tiene dentro de su territorio únicamente caminos rurales de terracería. El servicio de correo es suministrado a la población en la cabecera municipal por medio de una agencia postal. El servicio de teléfono se ofrece a través de una caseta en el poblado de Portezuelo. Existe una línea de autobuses locales que cubren la ruta de San Luis Potosí a Portezuelo.

El Municipio ofrece a los habitantes de la cabecera municipal y a los de algunas rancherías, servicio de electrificación, panteones, seguridad pública y agua potable.

I.8 HISTORIA.

La ciudad de San Luis Potosí debe su fundación al descubrimiento del Mineral de Cerro de San Pedro, considerado como uno de los minerales más ricos hasta entonces conocidos en la Nueva España.

La fecha precisa del descubrimiento del Mineral se desconoce. El ingeniero José María Gómez del Campo en su documento "Noticia del Mineral de San Pedro" (1878), señala el año de 1583 como fecha del descubrimiento del rico criadero de oro y plata del Cerro de San Pedro por Don Pedro Iriarte. El mismo autor, en otro escrito "Noticia del Mineral de San Pedro" (1881), señala que Antonio Lorenzana en el año de 1568 ya hacía mención de las minas de este Mineral, y que el descubrimiento fue hecho por unos abigeos perseguidos por la justicia y que al refugiarse en la Sierra de San Pedro hicieron fuego, fundiéndose el plomo y haciendo su aparición a la vista la plata y el oro. En la época colonial no se perseguía a los criminales que descubrían criaderos metálicos y con esa confianza los abigeos dieron aviso del hallazgo.

Otros documentos coinciden en señalar como fecha del descubrimiento el día 4 de Marzo de 1592 cuando el Capitán Miguel Caldera, informado por Fray Diego de la Magdalena de la existencia de oro y plata en los cerros ubicados al oriente del poblado de San Luis, comisionó a un grupo de españoles para localizar el sitio y catear y tomar minas. Y que fue Don Pedro de Anda quién dió a este Mineral el nombre de Cerro del Señor San Pedro.

La escasez de agua en el Mineral de Cerro de San Pedro fue un obstáculo para el tratamiento del mineral extraído, por lo que en el poblado de San Luis y en otros puntos cercanos al Mineral se establecieron haciendas de beneficio con más de 100 hornos de fundición. Es por esto que se confundía al Mineral con el poblado de San Luis.

Una vez consumada la paz con los indios quachichiles el pueblo

de San Luis, que comenzó a ser llamado San Luis Potosí el año de 1609, fue fundado legalmente el 3 de Noviembre de 1592.

El origen del nombre de San Luis a la hoy ciudad, es dudoso, pues unos historiadores dicen que Don Luis de Leixa, quién la fundó, le dió su nombre al ser erigida en pueblo; y otros, que fue dado en honor a Don Luis de Velasco, segundo de este nombre.

Respecto al sobrenombre de "Potosí" dado a la ciudad de San Luis, J. M. Gómez del Campo (1878), refirió lo siguiente:

"El Mineral de San Pedro en los primeros tiempos de su explotación fue muy notable por la riqueza en oro y plata de sus depósitos, debiéndose a esta circunstancia el sobrenombre de Potosí, dado a la ciudad de San Luis, por su analogía con la riqueza de la montaña Hatun-Potocchi, del Alto Perú, hoy Bolivia, descubierta en 1545 a una elevación de 4166 m.s.n.m., en una mesa, donde se puso el asiento del antiguo famoso mineral, y donde sucesivamente se edificó después, la ciudad del Potosí o Potosí".

El incremento de la población y la acumulación de la riqueza hizo que el Pueblo de San Luis se elevara a la categoría de Villa y el 30 de Mayo de 1656 el Virrey don Francisco Fernández de la Cueva, duque de Alburquerque le concedió el título de Ciudad, título confirmado por el rey Felipe IV el 17 de Agosto de 1658, concediéndole por escudo de armas la imagen de San Luis Rey de Francia, parada sobre el Cerro de las minas de San Pedro, en campo de oro y azul, con dos barras de oro en lo azul y dos de plata en el oro.

Sin embargo, la formación de hundidos, la disminución de la abundancia y riqueza del Mineral y el descubrimiento de otros nuevos y ricos minerales propició el abandono del Mineral de San Pedro en el año de 1622, aunque no fue del todo abandonado continuando su explotación a menor escala.

No existen datos precisos para determinar la cantidad de oro y plata extraída durante el período de bonanza de las minas del Mineral. J. M. Gómez del Campo (1878), hace referencia del libro de los títulos de la ciudad de San Luis Potosí, en el que se menciona que por el año de 1655 la cantidad pagada a la corona como quinto real (la quinta parte del producto) ascendía a más de \$72,000,000. Y para el año de 1778 la cantidad ascendía a \$97,000,000.

En el año de 1816 una compañía anónima inició en el Cerro del Pópulo la apertura del Socavón Victoria, obra calificada como la más atrevida y de mayor importancia debido a las profundidades que se alcanzarían con esta obra, permitiendo explorar nuevos terrenos, la habilitación de minas antiguas, y la comunicación, ventilación y extracción de escombros y frutos de la mayor parte de las minas del Mineral, abiertas en los Cerros del Pópulo, San Pedro y de La Reposa.

Para 1878 el Socavón Victoria tenía un cuele de 215 m con una altura de 2.50 m, trazado con un rumbo N8°W.

El ingeniero Camilo Bros calificó al Socavón Victoria como una obra magnífica, pues con la dirección de su trazo, Norte-Sur prácticamente cortaba de manera perpendicular a los hilos metálicos que seguían en general una orientación este-oeste, permitiéndole cortar nuevos hilos.

Con las siguientes palabras J. M. Gómez del Campo (1878) describió los cuerpos minerales del Mineral de San Pedro:

"Los criaderos se presentan en masas informes, de grandes dimensiones, que por sus oquedades parecen galeras, bodegas, bolsas, nudos, nidos, que se comunican por hilo u hojas, por las comisuras de la roca calcárea... Hay oquedades que ofrecen amplitud de ochenta a cien metros de longitud, y sobre treinta a cuarenta de latitud, y de cuarenta a cincuenta de altura... Las mineralizaciones son de los metales de hierro, manganeso, plomo, barita, calcio y plata, envolviendo partículas de oro: así tenemos los óxidos de hierro, de manganeso, de cobre y de plomo; sulfuros de hierro, de arsénico y de plata; carbonatos de plomo y cal, fosfatos y cromatos de plomo, bromuro, arseniuro, yoduro y cloruro de plat; carbonatos y sulfuros de cobre".

Para el año de 1870 la mayor parte del Distrito fue consolidada por la Compañía La Victoria Y Anexas, que emprendió obras importantes para su explotación, entre ellas la continuación del cuele del Socavón Victoria comenzado en 1816.

Para el año de 1895 la Compañía Metalúrgica Mexicana tomó en arrendamiento parte de los lotes de la Compañía La Victoria y Anexas y denunció otros a nombre propio. Además obtuvo la concesión para establecer la fundición de Morales, ubicada cerca de la ciudad de San Luis Potosí y a una compañía subsidiaria de la misma se le otorgó la concesión del ferrocarril Potosí-Río Verde, con un ramal a Cerro de San Pedro.

Para 1878 el ingeniero Camilo Bros calculaba el rendimiento del Mineral en quinientos marcos de plata mixta (113.500 kg) y ochocientos arrobas de plomo (9,200 kg) al mes.

Para 1904 eran cuatro las principales compañías en el Mineral de San Pedro: El Barreno y Anexas, San José de Cocinera, La Victoria y Anexas que poseía cuatro quintas partes del territorio y tenía una producción diaria de 75 toneladas de mineral, y la Compañía Metalúrgica Mexicana que poseía bajo arrendamiento el territorio que se hallaba debajo del túnel Victoria.

Para este período sólo existen escasos datos de la producción: en el año de 1902 se extrajeron 7,905 toneladas de mineral, en el año de 1903 se extrajeron 21,199 toneladas y en 1910, 93,089 toneladas.

El señor Roberto Fernández hizo en mayo de 1922 una descripción de las leyes del mineral en la mina de la Victoria:

La ley media del mineral de primera clase contenía de plata 275 g/ton, de oro 18 g/ton, plomo 12%, zinc 3%, fierro 26.9%, sílice 31.8%, cal 2%. Representaba la mitad del tonelaje y era

mineral de las mejores labores de la zona Juárez.

El mineral de segunda clase contenía de plata 392 g/ton, de oro 7 g/ton, plomo 7.7%, fierro 16.2% y sílice 53.7%. Representaba cerca del 30% de la producción y provenía de las obras de exploración de los niveles más bajos de la zona Juárez y de algunos pilares y retacos de Begoña.

El mineral de tercera clase contenía de plata 300 g/ton, de oro 1.2 g/ton, plomo 3%, fierro 7% y sílice 65%. Provenía de antiguos pilares de la parte superior de la zona de Dorotea.

Para 1922 la producción en la mina de La Victoria fue de 2,300 toneladas mensuales.

La propiedad de San Pedro fue adquirida en 1905 en parte por Towne Mines Corporation, la cual en el período comprendido entre 1909 y 1923 produjo arriba de 600,000 toneladas cortas de mineral con un valor fundido neto de aproximadamente \$4,000,000 y una ganancia neta de \$400,000.

En el año de 1925 la Compañía Metalúrgica Mexicana, subsidiaria de ASARCO era la propietaria de gran parte de las minas, que adquirió mediante compra, arrendamiento y denuncia.

De 1923 a 1948 bajo la administración de la Compañía Minera ASARCO la producción fue de 2,143,419 toneladas métricas de sulfuros promediando 4.2 g de oro, 3.9 onzas de plata y 4.8% de plomo, dejándole una ganancia neta de \$2,265,010.

Las reservas calculadas en Enero de 1948 eran de:

-Sulfuros de alto grado (50% disponibles, 50% atrapadas):

| T.M.S. | Au/g | Ag/g | Pb% | Zn% | Cu% | Fe% | S% |
|---------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| 444,000 | 3.7 | 272 | 4.3 | 7.7 | 0.11 | 23.2 | 29.4 |

-Sulfuros de bajo grado

| T.M.S. | Au/g | Ag/g | Pb% | Zn% | Cu% | Fe% | S% |
|-----------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| 3,077,000 | 1.6 | 56 | 0.8 | 3.5 | 0.04 | 30.1 | 35.1 |

La Compañía suspendió los trabajos de explotación en 1948 debido a problemas por incendio en las minas por combustión espontánea de los sulfuros, a los bajos valores de las reservas y por problemas sindicales.

Todo el equipo fue removido o vendido, incluyendo rieles e instalaciones superficiales.

Desde entonces la actividad minera ha quedado reducida al gambusinaje y a la explotación de terreros.

I.9 ESTUDIOS PREVIOS.

El estudio más antiguo encontrado es el escrito por el ingeniero José María Gómez del Campo en Marzo de 1878, en el que

hace una breve descripción de la geología local y de los cuerpos minerales.

El ingeniero Camilo Bros en sus "Ligeros Apuntes Sobre El Mineral de San Pedro", (1878), enumera las minas que entonces laboraban, describe los diferentes productos extraídos de las minas y el tipo de beneficio al que eran sometidos.

En 1901 el Sr. Frederick W. Taylor, gerente general de la Compañía Metalúrgica Mexicana, emprendió el primer trabajo sistemático de mapeo de las minas del Distrito (Laird, 1905).

En Noviembre de 1903, G. I. Finlay publicó su trabajo titulado "Geology of the San Pedro District".

George A. Laird (1905) en su trabajo "The Gold-Mines of the San Pedro District, Cerro de San Pedro, State of San Luis Potosí, Mexico", describe brevemente la geología del Distrito. Presenta una clasificación de las menas, describe los trabajos realizados en las minas, las formas de los cuerpos, sus mineralizaciones y los métodos de explotación practicados. Explica además el posible origen de la mineralización.

De la visita hecha por el inspector de minas Roberto Fernández en 1922, se desprende un reporte del que sobresale una descripción detallada que incluye mineralogía, textura y clasificación, tanto de los cuerpos minerales como del intrusivo. Explica la naturaleza de la mineralización y su edad. Les asigna también una edad a las rocas calcáreas y al intrusivo.

En 1926 Basil Prescott, geólogo consultor de la ASARCO realizó un estudio de los principales rasgos estructurales del distrito, determinó la edad de las fallas principales, del plegamiento de las rocas calizas y su relación con la intrusión.

De 1926 a 1948 la compañía minera ASARCO realizó estudios de exploración geológica con fines de evaluar y aumentar sus reservas.

Del trabajo "Geología del Distrito Minero Cerro de San Pedro" realizado por Balbontín Montaño, B.H., (1972) destacan los resultados obtenidos en la exploración geofísica utilizando polarización inducida con la cual se determinó la presencia de anomalías entre los 250 y 300 metros de profundidad.

El C.R.N.N.R. en 1975 realizó un estudio de exploración geoquímica de semidetalle, empleando el método de sedimentos de arroyo, exploración con la que se detectaron algunas anomalías de interés.

El último trabajo publicado, "Geología y mineralización disseminada en el yacimiento Cerro de San Pedro, S.L.P.", (1991), se deriva de los trabajos de exploración e investigación que la Compañía Fresnillo actualmente está llevando a cabo en el distrito, con-el objeto de definir mineralización disseminada con leyes de Au-Ag.

II. INFORMACION GEOLOGICA

II.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL.

El área de estudio se ubica dentro de la unidad geológica denominada como Cuenca Mesozoica del Centro de México, específicamente en el margen oriental de la misma, bordeando a la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

La Cuenca Mesozoica del Centro de México es una gran cuenca sedimentaria en la que se depositó una columna de más de 5,000 m de espesor de sedimentos marinos del Triásico Superior, Jurásico Superior, Cretácico Inferior, Medio y Superior (Carrillo Bravo, 1982).

Esta columna de sedimentos se depositó en una zona en la que probablemente se depositaron sedimentos marinos del Paleozoico Superior. En el Triásico Tardío la Cuenca Mesozoica fue transgredida por aguas marinas de profundidad considerable. A fines del Triásico y hasta principio del Jurásico Temprano la cuenca se vio afectada por una emersión con la consecuente ausencia de sedimentos marinos. En el Jurásico Medio y Tardío se depositaron en algunos sitios capas rojas continentales y para el Oxfordiano se produjo una nueva transgresión marina que perduró hasta el Cretácico Tardío cuando la región se vio afectada por los eventos de la Orogenia Laramide, la cual deformó los sedimentos de la cuenca y se produjo la intrusión de cuerpos graníticos y la retirada de los mares hacia el oriente. Para el Terciario y Cuaternario el área estuvo sujeta a actividad ígnea de tipo extrusiva.

Noguez (1977) señala que el área se encuentra estructuralmente en el flanco occidental de un gran anticlinal cuyo eje pasa aproximadamente a 7 km al E con un rumbo NNW-SSE.

La Orogenia Laramide dió origen a la mayoría de los rasgos estructurales de la zona. Los ejes estructurales se encuentran orientados NW-SE, con una gran cantidad de pliegues secundarios del tipo recostado y chevron, donde la mayor parte de las estructuras son del tipo asimétrico y recostado hacia el noreste (Labarthe y Tristán, 1978).

II.2 GEOLOGIA LOCAL.

ESTRATIGRAFIA.

SISTEMA MESOZOICO.

FORMACION TAMAULIPAS INFERIOR.

Esta Formación consiste de calizas de color gris a gris oscuro, estratificadas en capas gruesas de 30 a 60 cm en promedio, que forman bancos hasta de más de 3 m de potencia, que presentan líneas estilolíticas paralelas a la estratificación, nódulos de pedernal y pequeñas concreciones de hematita; con un

espesor aproximado de 300 m (Noguez, 1977).

El contacto de esta Formación hacia su base se desconoce y es sobreyacida concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. A la Formación Tamaulipas Inferior se le ha asignado una edad Cretácico Inferior que va del Valanginiano al Barremiano (Fig. 3).

FORMACION CUESTA DEL CURA.

El nombre de esta Formación fue propuesto por Imlay (1936) para definir un paquete de rocas de 64 m de espesor que consiste principalmente de calizas compactas de estratificación delgada y ondulante, de color gris oscuro a negro, que incluye divisiones lutíticas grises y bandas de pedernal que se encuentran expuestas en la Sierra de Parras, Coahuila.

En el área la Formación consiste de calizas microcristalinas de color gris oscuro a negro con estratificación delgada a gruesa y generalmente ondulante con bandas y nódulos de pedernal negro y gris y con intercalaciones delgadas de lutitas calcáreas.

La unidad está fuertemente plegada y deformada, encontrándola en posición horizontal y hasta con echados de 90° y con pliegues en chevron.

Estratigráficamente la unidad sobryace en contacto concordante a la Formación Tamaulipas Inferior y es sobreyacida en discordancia angular por rocas volcánicas terciarias. El espesor estimado de esta Formación en el área es de más de 120 m.

La unidad se depositó en un ambiente de cuenca de aguas profundas en la cual se produjeron movimientos del fondo marino, que dieron origen a la estratificación ondulante, característica de la Formación. Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Albiano-Cenomaniano.

SISTEMA TERCIARIO.

INTRUSION IGNEA.

El intrusivo corresponde a un pórfido diorítico de hornblenda y biotita, de color gris verdoso y de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y escasos de biotita y cuarzo incluidos en una matriz microcristalina (Victoria, 1990).

El cuerpo es un dique con rumbo NW20°SE y echado al poniente que intrusión al paquete calcáreo. Hacia la cima es de forma muy irregular con buzamiento promedio de 35° y hacia la base su contacto con las rocas calcáreas es más uniforme con echados de 50° a 70°. El dique tiene una longitud aproximada de 2 km y su espesor varía de 150 m a más de 500 m a profundidad.

El intrusivo fue emplazado muy cerca del plano axial de un anticlinal recumbente y se le ha asignado una edad del Eoceno.



EXPLICACION

- IGNIMBRITA SANTA MARIA
- INTRUSIVO DIORITICO
- CALIZA CUESTA DEL CURA
- CALIZA TAMAULIPAS INFERIOR
- EJE DE ANTICLINAL RECUMBENTE
- EJE DE SINCLINAL RECUMBENTE
- OXIDOS-SULFUROS A-A2
- FALLAS - FRACTURAS
- COLAPSOS

PLANO GEOLOGICO DEL DISTRITO

TOMADO DE LONGORIA Y VICTORIA (1990)

| | | |
|----------------------------|------------------------|--|
| U N A M | FACULTAD DE INGENIERIA | |
| | INGENIERO GEOLOGO | |
| | TESIS PROFESIONAL | |
| | PLANO GEOLOGICO DEL | |
| | PROYECTO MINERO CERRO | |
| DE SAN PEDRO, S.L.P. | | |
| RICARDO GARCIA COLLAZO | | |
| NAVY 92 | FIGURA 3 | |

ROCAS VOLCANICAS.

Estas rocas volcánicas son piroclásticas intermedias y ácidas que descansan en discordancia angular sobre las calizas de la Formación Cuesta del Cura. Las rocas intermedias son flujos andesíticos con espesores que van de 2 a 10 m (Balbontín, 1972). Las rocas volcánicas ácidas consisten de flujos riolíticos de color gris rosáceo que descansan discordantemente sobre las andesitas y sobre las rocas sedimentarias cretácicas. Su espesor en las cercanías del Cerro de San Pedro es de 30 m. Estas rocas ácidas pertenecen a la ignimbrita Santa María, unidad definida por Labarthe, et al., 1982. A estas rocas se les ha asignado una edad del Oligoceno.

SISTEMA CUATERNARIO.

Este sistema se encuentra pobremente representado en el área; consiste de depósitos de pie de monte, siendo brechas de fragmentos de rocas ígneas y de calizas, con matriz de caliche o de arcilla y arena, también se encuentra caliche en capas delgadas. Los depósitos aluviales son escasos y consisten de gravas y arenas diversas en bancos situados en los recodos de los arroyos, su composición es principalmente calcárea.

ESTRUCTURAS.

PLIEGUES.

Prescott (1926) señala la existencia de dos anticlinales, uno con eje NW-SE, que coincide con el eje de la intrusión ígnea que aflora en la parte central del poblado de Cerro de San Pedro y otro, que probablemente tiene su eje al W de las minas Barreno y Begoña, con la misma dirección del primero.

Los pliegues y estructuras locales tienen una orientación predominante NW-SE, formando un sistema bien definido con rumbo N10°W que controla la mineralización en el distrito.

El plegamiento es muy intenso, se presenta en recumbencias, recostamientos y chevrones pequeños.

FALLAS.

Son tres las fallas principales: la falla Princesa, la Méndez, y la Victoria. Las tres fallas son de tipo normal y son post-intrusivas y post-minerales.

FALLA PRINCESA. Esta falla se ha detectado desde la superficie hasta el nivel 425 de la mina San Pedro. El rumbo de la falla es E-W en la parte oriental y N40°W en la occidental, su echado es de 45 a 52 al sur. El alto de la falla tiene una dislocación de 70 m.

FALLA MENDEZ. Su rumbo es N45°W con echado al SW de 45 a 50°. El desplazamiento total provocado por esta falla es de 75 m.

FALLA VICTORIA. La falla tiene un rumbo N20°W y su echado es de 75° al SW. El desplazamiento total es de aproximadamente 60 m.

Estas tres fallas y el contacto intrusivo-caliza controlan la mineralización a profundidad. Estas fallas parecen controlar la oxidación de los cuerpos ya que se encontraron óxidos a profundidades de hasta 400 m, en tanto que en sitios no afectados por fallas la zona de oxidación desaparece entre los 50 y 60 m.

II.3 GEOLOGIA HISTORICA.

La Cuenca Mesozoica del Centro de México se desarrolló sobre una zona en la que probablemente se depositaron sedimentos marinos del Paleozoico (Carrillo Bravo, 1982).

Durante el Triásico Temprano y Medio, todo el centro de México permaneció emergido. En el Triásico Tardío a consecuencia de la separación de América del Sur-Africa y América del Norte, se inició la apertura del Golfo de México, apertura que finalizó en el Jurásico Medio (Coney, 1983). Con esta separación se produjo un fallamiento en bloques, siendo el centro de México transgredido por aguas marinas de considerable profundidad, en las que se efectuó el depósito de sedimentos arcillo-arenosos de la Formación Zacatecas. Esta transgresión marcó el inicio de la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo Bravo, 1982).

Al mismo tiempo de la ruptura, la zona estuvo influenciada por la presencia al poniente de un arco volcánico, manifestado por la presencia de rocas volcánicas en la Formación Zacatecas.

Durante el Jurásico Temprano y Medio el área permaneció emergida, no efectuándose depositación marina. Para el Jurásico Medio y principios del Jurásico Superior, en algunos sitios se depositaron las capas rojas continentales de la Formación La Joya.

Para el Oxfordiano ocurrió una transgresión marina que dió lugar al depósito de sedimentos de plataforma, representados por las calizas de la Formación Zuloaga.

Durante el Kimmeridgiano-Tithoniano la profundidad de los mares se incrementó, con lo que se originó un aumento en el aporte de material terrígeno, depositándose las calizas arcillosas y lutitas de la Formación La Caja.

Durante el Cretácico Temprano y Medio, la Cuenca incrementó su profundidad, depositándose los sedimentos de las Formaciones Taraises, Tamaulipas Inferior -con la cual se inicia el registro geológico en el área-, La Peña y las calizas de estratificación delgada ondulante de la Formación Cuesta del Cura.

En el Cretácico Tardío ocurrió un cambio drástico en el régimen de sedimentación, caracterizándose por el aporte de terrígenos y material volcánico provenientes del poniente, en donde tenía lugar un levantamiento asociado a actividad volcánica y plutónica por el desarrollo de un arco volcánico. Estos levantamientos causaron la retirada paulatina de los mares hacia el oriente, con el desarrollo de deltas prográdantes y líneas de

costa migrantes, produciéndose en la Cuenca el depósito de calizas, lutitas calcáreas y areniscas de la Formación Indidura, durante el Turoniano y los sedimentos de tipo flysch de la Formación Caracol, del Coniaciano-Maastrichtiano (Morán, 1984).

Estos depósitos de tipo flysch representan las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide.

A fines del Cretácico y durante el Paleoceno y Eoceno el área estuvo sometida a los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, la cual plegó y deformó los sedimentos del Mesozoico.

Esta deformación originó la serie de pliegues orientados preferencialmente NW-SE que se encuentran en el área.

Hacia el final de la Orogenia, en el Eoceno Tardío, se emplazaron cuerpos intrusivos, como el intrusivo de Cerro de San Pedro, a los cuales está asociada directa o indirectamente la mineralización.

En el Oligoceno ocurrió vulcanismo de tipo ácido, durante el cual se originó el paquete de riolitas que se encuentran en el área. Vulcanismo asociado a la regresión del arco magmático hacia la costa del Pacífico, fenómeno que terminó hasta el Mioceno (Damon, et.al., 1981).

El período Plioceno-Cuaternario se caracterizó por una tectónica extensiva, acompañada por vulcanismo basáltico.

II.4 YACIMIENTOS MINERALES.

El yacimiento de Cerro de San Pedro está caracterizado por los siguientes tipos de mineralización:

1. Cuerpos de reemplazamiento en calizas que consisten en mantos y chimeneas de óxidos y sulfuros ligados al contacto intrusivo-caliza. Los cuerpos oxidados consisten de óxidos de hierro masivo-terrosos (goethita-limonita) con valores de Au-Ag y los cuerpos de sulfuros con contenidos de Au-Ag-Pb-Zn. La mineralización de reemplazamiento gradúa cerca de la superficie a mineralización de relleno de cavidades, que consiste de vetas cuarzosas ricas en oro y plata con algo de plomo, encajonadas tanto por las calizas como por el intrusivo. Estos cuerpos, que hicieron famoso a este distrito minero, han sido prácticamente minados.
2. Mineralización diseminada de Au-Ag en calizas. Este tipo de mineralización está restringida a los halos de alteración que bordean a las chimeneas de óxidos masivos.
3. Mineralización diseminada y en vetillas de Au-Ag en el intrusivo. La mineralización de las vetillas de la zona de óxidos está constituida por óxidos de hierro, en los que el oro y los minerales de plata (plata nativa y acantita) se encuentran incluidos. En las vetillas de la zona de sulfuros

consiste de pirita-esfalerita-galena-tetrahedrita-arsenopirita-calcopirita y acantita.

La mineralización disseminada en calizas y disseminada y en vetillas en el intrusivo constituye actualmente el objetivo principal de la exploración.

II.5 ORIGEN DE LA MINERALIZACION.

Los depósitos minerales se formaron por reemplazamiento, relleno de cavidades y disseminación, a partir de soluciones hidrotermales relacionadas con la actividad magmática del área. La mineralización fue posterior a la intrusión diorítica, una vez que esta se enfrió y estuvo sujeta a fracturamiento. Estas fracturas sirvieron de conducto para el ascenso de las soluciones mineralizantes.

La mineralización de brecha se produjo a lo largo del contacto de la roca ígnea con las calizas o dentro de estas, a corta distancia del intrusivo.

Este tipo de mineralización está controlada por el contacto intrusivo-caliza y por las fracturas en las calizas provocadas durante el plegamiento laramídico y por la intrusión misma.

Los depósitos de relleno de cavidades se formaron después de los depósitos de reemplazamiento.

Los depósitos disseminados son contemporáneos a la mineralización de reemplazamiento. Las zonas de fracturas dentro del intrusivo son un control para la mineralización disseminada ya que favorecieron a su alteración; estas zonas de fracturas contienen valores de oro.

Posteriormente, la mineralización hipogénica se vio afectada por procesos supergénicos, en la que fluidos de origen metaérido lixiviaron y alteraron a los minerales más inestables y depositaron su contenido en la zona de oxidación.

Esta mineralización está controlada por las zonas de fracturas y por las fallas post-minerales, pues estas facilitan la circulación de las aguas causantes del proceso.

III.1 INTRODUCCION.

Un propósito común del geólogo y del geoestadístico, cuando se habla de un depósito mineral, es obtener la mejor estimación de las características (ley, espesor, etc.) del depósito de manera que puedan ser tomadas fuertes decisiones económicas concernientes a la exploración y explotación.

Sin embargo, las características cualitativas o cuantitativas de un depósito no pueden ser conocidas en su totalidad debido a que la información no es accesible en todos los puntos o porque un análisis de toda la población es inconcebible, por lo que sólo es posible hacer estimaciones de estas características basándose en el conocimiento de un número limitado de muestras, las cuales representan una pequeña fracción del volumen total del depósito (Deverly, 1984).

El acercamiento geológico va a consistir de un análisis estructural, mineralógico y/o de otras características del depósito para ganar conocimiento de la génesis del mismo. Por su parte, el geoestadístico tiene como papel principal el cuantificar las características (ley, espesor) del depósito, para lo cual, en conjunción con el geólogo debe valorar la información que sea relevante a fin de que los resultados sean significativos.

III.2 OBJETIVOS.

Los objetivos planteados para este estudio fueron primero demostrar la aplicabilidad de la Geoestadística al depósito de Cerro de San Pedro.

Los objetivos específicos para esta primera etapa fueron:

Un análisis estadístico de las variables: ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE.

Determinar cuál de las variables ORO 1, ORO 2, u ORO PROMEDIO es la más conveniente para llevar a efecto el cálculo de reservas.

Un análisis estructural (construcción de semivariogramas) de cada una de las variables mencionadas.

Una vez demostrada la aplicabilidad de la Geoestadística al depósito, la segunda tarea consistiría en evaluar las reservas minerales utilizando la técnica del kriging, es decir, obtener el mejor estimador lineal insesgado posible de las características del yacimiento.

Hacer un análisis del muestreo realizado en el área explorada con el propósito de determinar la estrategia de exploración a

seguir en ella.

Y por último, diseñar una estrategia de exploración para una área nueva del depósito, determinando la configuración y distancia óptima entre barrenos.

III.3 EVALUACION DE LA INFORMACION.

La evaluación geoestadística del Proyecto Minero Cerro de San Pedro se llevó a cabo con la información proveniente de los trabajos de exploración con barrenación (barrenación de circulación inversa).

La información disponible consistió de 18 barrenos verticales con muestreo continuo a lo largo de cada uno. Estos barrenos están distribuidos de manera no uniforme, cubriendo una área irregular cuyas dimensiones máximas son de 400 m x 600 m. Esta zona representa la parte central del área que abarca el Proyecto, cuyo objetivo esencial es definir mineralización diseminada de Au-Ag atractiva tanto en tonelaje como en ley.

De cada barreno, con coordenadas conocidas (x,y,z), se contó con un número variado de muestras de espesor constante (2.03 m), las cuales hicieron un total de 2309, disponiendo de cada una de estas muestras la siguiente información:

- coordenadas (x,y,z)
- espesor
- ley de oro (g/ton) (dos ensayos más el promedio de los dos ensayos anteriores)
- ley de plata (g/ton)
- ley de plomo (g/ton)
- ley de zinc (g/ton)
- ley de cobre (g/ton)
- control geológico.

En la Tabla 1 se muestra un extracto del archivo original.

III.4 METODOLOGIA.

La metodología empleada para alcanzar los objetivos propuestos fue la siguiente:

1. Recopilación de la información.
2. Evaluación de la información geológica.
3. Depuración y captura de la información en medios magnéticos.
4. Análisis estadístico.
5. Análisis estructural.
6. Configuración del cuerpo intrusivo.
7. Krigeage.
8. Distribución geográfica.
9. Diseño de las estrategias de exploración.

TABLA 1. ARCHIVO ORIGINAL

| MUESTRA | DE | A | ESP. | OR01 | OR02 | PR0M. | AG | FD | 2N | CU |
|---------|--------|--------|------|------|------|-------|----|-------|------|-----|
| 47000 | 0.01 | 2.63 | 2.63 | 2.09 | 2.19 | 2.140 | 70 | 11200 | 7100 | 275 |
| 47001 | 2.63 | 4.66 | 2.03 | 1.43 | 1.45 | 1.440 | 38 | 4800 | 2200 | 71 |
| 47002 | 4.66 | 6.69 | 2.03 | 1.12 | 1.29 | 1.215 | 23 | 7700 | 4400 | 114 |
| 47003 | 6.69 | 8.73 | 2.03 | 1.01 | 1.87 | 1.840 | 30 | 8150 | 4100 | 146 |
| 47004 | 8.73 | 10.75 | 2.03 | 2.50 | 2.45 | 2.475 | 36 | 8600 | 3800 | 174 |
| 47005 | 10.75 | 12.78 | 2.03 | 0.40 | 0.41 | 0.405 | 12 | 1900 | 3500 | 38 |
| 47006 | 12.78 | 14.81 | 2.03 | 0.41 | 0.52 | 0.465 | 7 | 1200 | 2700 | 28 |
| 47007 | 14.81 | 16.84 | 2.03 | 0.45 | 0.44 | 0.445 | 19 | 1200 | 5100 | 37 |
| 47008 | 16.84 | 18.87 | 2.03 | 0.54 | 0.45 | 0.495 | 10 | 1360 | 3000 | 40 |
| 47009 | 18.87 | 20.90 | 2.03 | 0.54 | 0.62 | 0.580 | 9 | 1100 | 4600 | 30 |
| 47010 | 20.90 | 22.93 | 2.03 | 0.63 | 0.54 | 0.585 | 9 | 760 | 3000 | 27 |
| 47011 | 22.93 | 24.96 | 2.03 | 0.47 | 0.52 | 0.495 | 8 | 1100 | 2100 | 32 |
| 47012 | 24.96 | 26.99 | 2.03 | 0.45 | 0.40 | 0.425 | 7 | 1600 | 2000 | 24 |
| 47013 | 26.99 | 29.02 | 2.03 | 0.43 | 0.48 | 0.455 | 8 | 840 | 1700 | 23 |
| 47014 | 29.02 | 31.05 | 2.03 | 1.00 | 0.92 | 0.960 | 8 | 1300 | 2100 | 27 |
| 47015 | 31.05 | 33.08 | 2.03 | 0.80 | 0.70 | 0.750 | 10 | 4000 | 2900 | 98 |
| 47016 | 33.08 | 35.11 | 2.03 | 0.44 | 0.35 | 0.395 | 19 | 1900 | 4200 | 38 |
| 47017 | 35.11 | 37.14 | 2.03 | 1.75 | 0.88 | 1.315 | 14 | 2500 | 6900 | 65 |
| 47018 | 37.14 | 39.17 | 2.03 | 0.34 | 0.34 | 0.340 | 9 | 1800 | 2600 | 36 |
| 47019 | 39.17 | 41.20 | 2.03 | 0.19 | 0.18 | 0.185 | 5 | 260 | 3700 | 7 |
| 47020 | 41.20 | 43.23 | 2.03 | 0.33 | 0.33 | 0.330 | 8 | 730 | 1760 | 25 |
| 47021 | 43.23 | 45.26 | 2.03 | 0.74 | 0.63 | 0.685 | 11 | 2400 | 3100 | 46 |
| 47022 | 45.26 | 47.29 | 2.03 | 0.67 | 0.69 | 0.680 | 7 | 2000 | 4300 | 38 |
| 47023 | 47.29 | 49.32 | 2.03 | 0.49 | 0.47 | 0.480 | 15 | 1600 | 4600 | 43 |
| 47024 | 49.32 | 51.35 | 2.03 | 0.35 | 0.33 | 0.340 | 14 | 2100 | 3800 | 45 |
| 47025 | 51.35 | 53.38 | 2.03 | 1.64 | 1.01 | 1.325 | 9 | 2060 | 2100 | 45 |
| 47026 | 53.38 | 55.41 | 2.03 | 1.28 | 1.12 | 1.200 | 23 | 2900 | 1700 | 62 |
| 47027 | 55.41 | 57.44 | 2.03 | 1.14 | 1.14 | 1.140 | 9 | 1900 | 2300 | 58 |
| 47028 | 57.44 | 59.47 | 2.03 | 2.20 | 2.65 | 2.425 | 12 | 4300 | 1700 | 81 |
| 47029 | 59.47 | 61.50 | 2.03 | 1.01 | 1.39 | 1.600 | 8 | 3700 | 1900 | 62 |
| 47030 | 61.50 | 63.53 | 2.03 | 0.21 | 0.20 | 0.205 | 13 | 435 | 4000 | 46 |
| 47031 | 63.53 | 65.56 | 2.03 | 0.99 | 0.99 | 0.990 | 11 | 1500 | 3900 | 52 |
| 47032 | 65.56 | 67.59 | 2.03 | 0.78 | 0.04 | 0.810 | 6 | 1460 | 2100 | 49 |
| 47033 | 67.59 | 69.62 | 2.03 | 0.24 | 0.25 | 0.245 | 5 | 703 | 1260 | 12 |
| 47034 | 69.62 | 71.65 | 2.03 | 0.11 | 0.11 | 0.110 | 7 | 823 | 2800 | 30 |
| 47035 | 71.65 | 73.68 | 2.03 | 0.51 | 0.48 | 0.495 | 7 | 2700 | 1800 | 32 |
| 47036 | 73.68 | 75.71 | 2.03 | 0.45 | 0.45 | 0.450 | 5 | 1500 | 1800 | 14 |
| 47037 | 75.71 | 77.74 | 2.03 | 0.11 | 0.11 | 0.110 | 6 | 279 | 1300 | 82 |
| 47038 | 77.74 | 79.77 | 2.03 | 0.49 | 0.38 | 0.435 | 9 | 1100 | 1100 | 42 |
| 47039 | 79.77 | 81.80 | 2.03 | 0.34 | 0.39 | 0.365 | 5 | 1160 | 1300 | 43 |
| 47040 | 81.80 | 83.83 | 2.03 | 0.30 | 0.67 | 0.485 | 13 | 2000 | 1000 | 31 |
| 47041 | 83.83 | 85.86 | 2.03 | 0.12 | 0.13 | 0.125 | 5 | 342 | 590 | 19 |
| 47042 | 85.86 | 87.89 | 2.03 | 0.44 | 0.40 | 0.420 | 18 | 2100 | 900 | 31 |
| 47043 | 87.89 | 89.92 | 2.03 | 0.19 | 0.21 | 0.206 | 10 | 2160 | 320 | 13 |
| 47044 | 89.92 | 91.95 | 2.03 | 0.24 | 0.32 | 0.280 | 12 | 1200 | 600 | 10 |
| 47045 | 91.95 | 93.98 | 2.03 | 0.28 | 0.24 | 0.250 | 5 | 1000 | 500 | 10 |
| 47046 | 93.98 | 96.01 | 2.03 | 0.04 | 0.03 | 0.035 | 3 | 136 | 530 | 21 |
| 47047 | 96.01 | 98.04 | 2.03 | 0.15 | 0.17 | 0.160 | 6 | 1260 | 1100 | 31 |
| 47048 | 98.04 | 100.07 | 2.03 | 0.75 | 0.94 | 0.845 | 6 | 1600 | 360 | 44 |
| 47049 | 100.07 | 102.10 | 2.03 | 0.25 | 0.27 | 0.260 | 12 | 613 | 753 | 14 |
| 47050 | 102.10 | 104.13 | 2.03 | 0.15 | 0.12 | 0.135 | 4 | 624 | 1300 | 10 |
| 47051 | 104.13 | 106.16 | 2.03 | 0.11 | 0.14 | 0.125 | 4 | 472 | 1200 | 15 |
| 47052 | 106.16 | 108.19 | 2.03 | 0.07 | 0.09 | 0.075 | 1 | 69 | 910 | 35 |

A continuación se describen los alcances de cada de las etapas mencionadas:

1. Recopilación de la información.

La primera etapa consistió en la recopilación de la información del muestreo por barrenación con circulación inversa, además de una recopilación bibliográfica.

2. Evaluación de la información geológica.

En esta etapa se hizo una recopilación y análisis de la información geológica (litología, alteraciones, génesis de la mineralización y de la relación ley-litología) y se hizo la configuración del cuerpo intrusivo, mediante la elaboración de secciones geológicas y empleando la técnica de interpolación topográfica.

Las muestras provienen de dos unidades geológicas: de las rocas calcáreas y del cuerpo intrusivo.

Las rocas calcáreas sólo presentan ligera recristalización y en general presentan valores de muy poco interés a excepción de los tramos de calizas en contacto con el intrusivo que presentan leyes altas. Estas leyes se asocian a los cuerpos de brechas que aún existen.

El cuerpo intrusivo se encuentra afectado por las siguientes alteraciones: argilitización, sericitización, silicificación, carbonatación y limonitización; todas espacialmente traslapadas y asociadas con valores de oro.

La mineralización en el intrusivo se presenta en forma diseminada y en vetillas.

La información proveniente de las rocas calcáreas no fue considerada ya que los valores que estas contienen resultan de muy poco interés económico, evaluando sólo el potencial del cuerpo intrusivo. Después de esta depuración la información disponible se redujo a 1210 muestras del cuerpo intrusivo, las cuales constituyeron la población con la que se efectuó la evaluación geoestadística.

3. Depuración y captura de la información en medios magnéticos.

En esta parte la información recopilada fue depurada por las razones ya explicadas en el subtema anterior, reduciéndose la información a 1210 muestras de un total de 2309.

Debido a la gran cantidad de datos de los que se disponía, esto es, diez variables por cada muestra (que con 1210 muestras hicieron un total de 12,100 datos), fue necesario almacenar la información en dos archivos para su procesamiento.

El primero de estos dos archivos denominado como ARCHIVO ORO, contiene la siguiente información para cada una de las 1210 muestras:

Coordenada Este (X), coordenada Norte (Y), elevación, espesor de la muestra, resultado del primer ensayo por oro, al cual se le denominó como ORO 1, resultado del segundo ensayo por oro, denominado ORO 2, el promedio de los dos ensayos, ORO PROMEDIO y el número de identificación del barrenó (Tabla 2).

El segundo archivo generado, denominado ARCHIVO METALICO, contiene para cada una de las muestras la siguiente información:

Coordenada Este (X), coordenada Norte (Y), elevación, resultado de los ensayos por plata, plomo, zinc y cobre, así como el número de identificación del barrenó. (Tabla 3).

4. Análisis estadístico.

Una vez terminada la etapa de captura, se alimentó la computadora con los archivos ORO y METALICO para llevar a cabo el análisis estadístico y estructural de cada variable.

Para el análisis estadístico la información fue procesada en la opción ESTADISTICO del programa de cómputo EST3D, este análisis constó de siete sesiones, una por cada variable a evaluar.

En el análisis estadístico se llevó a cabo también el análisis de las variables transformadas (tomando el logaritmo de los valores).

5. Análisis estructural.

Para el análisis estructural la información fue procesada en la opción ESTRUCTURAL del programa EST3D. Para este análisis se requirió de una sesión para cada una de las variables.

El análisis estructural consistió en la construcción y modelado de los semivariogramas.

Debe mencionarse que los análisis estadístico y estructural no sólo consistieron de las sesiones de trabajo en la computadora, sino además de un análisis de los resultados obtenidos en dichas sesiones.

El programa base EST3D (en sus dos opciones) tuvo que ser modificado para adecuarlo a las características de los archivos generados, para poder realizar las sesiones de trabajo.

6. Configuración del cuerpo intrusivo.

Para efectos de evaluación el cuerpo intrusivo fue configurado por niveles (a cada 10 m), siendo cada uno de los niveles subdividido en superbloques, donde cada superbloque puede estar constituido por un mínimo de 1 bloque de 10 m x 10 m x 10 m y un máximo de 100 bloques.

La razón de subdividir el cuerpo intrusivo en bancos de 10 m es el de tener un conocimiento más detallado de la distribución geográfica de los valores, de manera que se pueda llegar al

TABLA 2. ARCHIVO ORO

| X | Y | Z | ESP. | ORO 1 | ORO 2 | PROM. | BNO |
|----------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5221.246 | 10554.577 | 2077.732 | 2.630 | 2.090 | 2.190 | 2.140 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2075.102 | 2.030 | 1.430 | 1.450 | 1.440 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2073.072 | 2.030 | 1.120 | 1.290 | 1.215 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2069.012 | 2.030 | 2.500 | 2.450 | 2.475 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2066.982 | 2.030 | 0.400 | 0.410 | 0.405 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2064.952 | 2.030 | 0.410 | 0.520 | 0.465 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2062.922 | 2.030 | 0.450 | 0.440 | 0.445 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2060.892 | 2.030 | 0.540 | 0.450 | 0.495 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2058.862 | 2.030 | 0.540 | 0.620 | 0.580 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2056.832 | 2.030 | 0.630 | 0.540 | 0.585 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2054.802 | 2.030 | 0.470 | 0.520 | 0.495 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2052.772 | 2.030 | 0.450 | 0.400 | 0.425 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2050.742 | 2.030 | 0.430 | 0.480 | 0.455 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2048.712 | 2.030 | 1.000 | 0.920 | 0.960 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2046.682 | 2.030 | 0.800 | 0.700 | 0.750 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2044.652 | 2.030 | 0.440 | 0.350 | 0.395 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2042.622 | 2.030 | 1.750 | 0.880 | 1.315 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2039.992 | 2.030 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2038.562 | 2.030 | 0.190 | 0.180 | 0.185 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2036.532 | 2.030 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2034.502 | 2.030 | 0.740 | 0.630 | 0.685 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2032.472 | 2.030 | 0.670 | 0.690 | 0.680 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2030.442 | 2.030 | 0.490 | 0.470 | 0.480 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2028.412 | 2.030 | 0.350 | 0.330 | 0.340 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2026.382 | 2.030 | 1.640 | 1.010 | 1.325 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2024.352 | 2.030 | 1.280 | 1.120 | 1.200 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2022.322 | 2.030 | 1.140 | 1.140 | 1.140 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2020.292 | 2.030 | 2.200 | 2.650 | 2.425 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2018.262 | 2.030 | 1.810 | 1.390 | 1.600 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2016.232 | 2.030 | 0.210 | 0.200 | 0.205 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2014.202 | 2.030 | 0.990 | 0.990 | 0.990 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2012.172 | 2.030 | 0.780 | 0.840 | 0.810 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2010.342 | 2.030 | 0.240 | 0.250 | 0.245 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2008.112 | 2.030 | 0.110 | 0.110 | 0.110 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2006.082 | 2.030 | 0.510 | 0.480 | 0.495 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2004.052 | 2.030 | 0.450 | 0.450 | 0.450 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2002.022 | 2.030 | 0.110 | 0.110 | 0.110 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1999.992 | 2.030 | 0.490 | 0.380 | 0.435 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1997.962 | 2.030 | 0.340 | 0.390 | 0.365 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1995.932 | 2.030 | 0.300 | 0.670 | 0.485 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1993.902 | 2.030 | 0.120 | 0.130 | 0.125 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1991.872 | 2.030 | 0.440 | 0.400 | 0.420 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1989.842 | 2.030 | 0.190 | 0.210 | 0.200 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1987.812 | 2.030 | 0.240 | 0.320 | 0.280 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1985.782 | 2.030 | 0.280 | 0.240 | 0.260 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1983.752 | 2.030 | 0.040 | 0.030 | 0.035 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1981.722 | 2.030 | 0.150 | 0.170 | 0.160 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1979.692 | 2.030 | 0.750 | 0.940 | 0.845 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1977.662 | 2.030 | 0.250 | 0.270 | 0.260 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1975.632 | 2.030 | 0.150 | 0.120 | 0.135 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1973.602 | 2.030 | 0.110 | 0.140 | 0.125 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1971.572 | 2.030 | 0.070 | 0.080 | 0.075 | BSP01 |

TABLA 3. ARCHIVO METALICO

| X | Y | Z | Ag | Pb | Zn | Cu | BNO |
|----------|-----------|----------|----|-------|------|-----|-------|
| 5221.246 | 10554.577 | 2077.732 | 70 | 11200 | 7100 | 275 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2075.102 | 38 | 4800 | 2200 | 71 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2073.072 | 23 | 7700 | 4400 | 114 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2069.012 | 36 | 8600 | 3800 | 178 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2066.982 | 12 | 1900 | 3500 | 34 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2064.952 | 7 | 1200 | 2700 | 28 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2062.922 | 19 | 1200 | 5100 | 37 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2060.892 | 10 | 1300 | 3000 | 40 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2058.862 | 9 | 1100 | 4600 | 30 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2056.832 | 9 | 760 | 3000 | 27 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2054.802 | 8 | 1100 | 2100 | 32 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2052.772 | 7 | 1600 | 2000 | 24 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2050.742 | 8 | 840 | 1700 | 23 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2048.712 | 8 | 1300 | 2100 | 27 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2046.682 | 10 | 4000 | 2800 | 98 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2044.652 | 19 | 1900 | 4200 | 38 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2042.622 | 14 | 2500 | 6900 | 85 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2040.592 | 9 | 1800 | 2600 | 36 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2038.562 | 5 | 268 | 3700 | 7 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2036.532 | 8 | 738 | 1700 | 25 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2034.502 | 11 | 2400 | 3100 | 46 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2032.472 | 7 | 2000 | 4300 | 38 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2030.442 | 15 | 1600 | 4600 | 43 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2028.412 | 14 | 2100 | 3800 | 45 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2026.382 | 9 | 2000 | 2100 | 45 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2024.352 | 23 | 2900 | 1700 | 62 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2022.322 | 9 | 1900 | 2300 | 58 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2020.292 | 12 | 4300 | 1700 | 81 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2018.262 | 8 | 3700 | 1900 | 62 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2016.232 | 13 | 435 | 4000 | 46 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2014.202 | 11 | 1500 | 3900 | 52 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2012.172 | 6 | 1400 | 2100 | 49 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2010.142 | 5 | 703 | 1200 | 12 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2008.112 | 7 | 823 | 2800 | 30 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2006.082 | 7 | 2700 | 1000 | 12 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2004.052 | 5 | 1600 | 1800 | 34 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 2002.022 | 6 | 279 | 1300 | 82 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1999.992 | 9 | 1100 | 1100 | 42 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1997.962 | 5 | 1100 | 1300 | 43 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1995.932 | 13 | 2000 | 1000 | 31 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1993.902 | 5 | 342 | 590 | 19 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1991.872 | 18 | 2100 | 904 | 31 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1989.842 | 10 | 2100 | 320 | 13 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1987.812 | 12 | 1200 | 600 | 10 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1985.782 | 5 | 1000 | 508 | 10 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1983.752 | 3 | 136 | 530 | 21 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1981.722 | 6 | 1200 | 1100 | 31 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1979.692 | 6 | 1600 | 300 | 44 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1977.662 | 12 | 813 | 753 | 14 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1975.632 | 4 | 634 | 1300 | 10 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1973.602 | 4 | 478 | 1200 | 15 | BSP01 |
| 5221.246 | 10554.577 | 1971.572 | 1 | 69 | 910 | 35 | BSP01 |

método de explotación que permita el mejor aprovechamiento del yacimiento.

Una vez configurado el cuerpo por niveles se elaboró un ARCHIVO DE CONTORNOS que contiene las coordenadas que delimitan a cada uno de los superbloques que constituyen a cada uno de los niveles; este archivo contiene además otros parámetros que requiere el programa de cómputo KRIG3D.

7. Krigeage.

En esta etapa se seleccionó el tipo de krigeage a emplear para llevar a efecto el cálculo de reservas, para lo cual se utilizó el programa de cómputo KRIG3D.

En esta misma etapa fue necesario hacer dos programas de cómputo, uno para la variable ORO y otro para la variable PLATA, para que procesaran los resultados de las evaluaciones de cada uno de los niveles, para así obtener el cálculo global de reservas de cada una de las variables.

El equipo de cómputo utilizado consistió de una computadora AT UNISYS (PC compatible con IBM) con una velocidad de operación de 12 MHz, con capacidad de memoria RAM de 640 KB, disco duro de 20 MB, con coprocesador matemático.

8. Distribución geográfica.

Efectuada la evaluación, se procedió a obtener la distribución geográfica para las leyes de oro y plata, con valores convertidos a dólares.

9. Diseño de las estrategias de exploración.

Para el área explorada se diseñó la estrategia de exploración a seguir en ella, que consistió en proponer barrenos adicionales de manera tal que cubran los huecos dejados por el muestreo practicado y mejorar así la estimación de reservas del área.

Para el diseño de la estrategia de exploración en una área nueva del depósito, se planteó una área hipotética de 500 m x 500 m, en la cual se simuló dos configuraciones de barrenación, una con disposición cuadrangular y otra triangular, para las cuales se hicieron variar las distancias de separación entre los barrenos.

IV. ANALISIS ESTADISTICO

IV.1 INTRODUCCION.

A medida que la cantidad de información disponible tiende a aumentar es más difícil recordar las características individuales de cada dato, por lo que resulta necesario obtener una representación más sencilla de los mismos, así como una manera sintética de describirlos. Esto puede lograrse con un análisis estadístico, mediante el cual se podrán conocer características básicas de la información.

El primer punto puede conseguirse construyendo un histograma, el cual permitirá discernir la naturaleza de la distribución estadística de las variables en consideración.

Prácticamente la totalidad de los fenómenos relacionados con las ciencias de la tierra pueden ajustarse a dos distribuciones estadísticas: a la distribución normal o a la distribución lognormal.

Además de conocer la distribución de probabilidad a la cual responde la variable, es necesario conocer ciertos parámetros que definan el comportamiento de la misma. Los parámetros descriptivos más usuales son la media y la varianza.

La media es una medida de tendencia central de la población. Para una variable con distribución normal la media aritmética resulta ser el mejor parámetro de tendencia central y para el caso de una variable lognormal resulta ser la media geométrica.

Por otra parte la varianza, como medida de dispersión, describe cómo se distribuye la población alrededor de su media.

Una vez conocida la distribución de probabilidad de la variable, puede determinarse el método geostadístico que deba ser utilizado para llevar a cabo el cálculo de reservas.

IV.2 CONCEPTOS BASICOS.

DISTRIBUCION NORMAL.

En forma general se dice que si la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria x esta dada por (1) entonces X tiene distribución normal, con parámetros μ y σ .

La media y la varianza son estimadas mediante las siguientes expresiones:

Media

$$\bar{x} = 1/n \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianza

$$\sigma^2 = 1/n-1 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad \text{para toda } x \dots (1)$$

DISTRIBUCION LOGNORMAL.

La distribución lognormal está definida como la distribución de una variable cuyo logaritmo obedece a la ley de la probabilidad normal.

Es decir, para una variable positiva $X(0 < x < \infty)$ tal que $Y = \log X$ este distribuida normalmente con media μ y varianza σ^2 , se dice entonces que X está distribuida lognormalmente y se denota como: $N(\mu, \sigma^2)$. Donde X no puede tomar el valor cero, ya que la transformación $Y = \log X$ no esta definida para $X = 0$.

$$dA(x) = \frac{1}{x \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} (\log x - \mu)^2 \right) dx \quad (x > 0)$$

Su media y varianza están dadas por:

Media

$$\bar{x} = \log \left(1/n \sum \log x_i \right)$$

Varianza

$$\sigma^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (\log x_i - \bar{x})^2$$

IV.3 ANALISIS ESTADISTICO.

Los objetivos para este análisis estructural fueron:

- i) Obtener la distribución de probabilidad de las variables ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE, para lo cual se construyeron histogramas experimentales y se realizaron pruebas de lognormalidad para cada una de las variables.
- ii) Obtener los parámetros estadísticos que definieran el comportamiento de cada una de las variables.
- iii) Determinar cuál de las variables ORO 1, ORO 2 u ORO PROMEDIO es la más conveniente para realizar la evaluación geoestadística.

El análisis estadístico para cada una de las variables consistió en lo siguiente:

1. Construcción de histogramas experimentales para obtener la distribución de probabilidad de cada una de ellas.

En la tabla 4 se presentan las estadísticas obtenidas para la variable ORO 1; en esta tabla, además de presentarse los parámetros descriptivos de la población - media y varianza, entre otros - se describen cada una de las clases que componen el histograma experimental, el intervalo de valores comprendido, su frecuencia y la frecuencia relativa.

La figura 4 corresponde al histograma experimental para la variable ORO 1, cuya descripción numérica se presenta en la tabla 4. En esta figura se puede ver cómo la variable ORO 1 está caracterizada por una alta frecuencia de valores bajos a medios y una muy baja frecuencia de valores medios a altos.

2. Construcción de histogramas para las variables transformadas (tomando su logaritmo).

En la tabla 5 se presentan las estadísticas correspondientes a la variable LOG (ORO 1) y su histograma respectivo se muestra en la figura 5.

En esta figura puede apreciarse como al considerar el logaritmo de los valores y construyendo su histograma respectivo, este presenta la forma de una curva de Gauss o curva normal, primera prueba del comportamiento lognormal de la variable ORO 1.

3. Construcción de gráficas de la distribución de frecuencia acumulada a escala log-probabilística, como prueba de lognormalidad.

En la figura 6 se presenta una gráfica de este tipo para la variable ORO 1 en la cual se puede apreciar la alineación de los puntos graficados, condición necesaria y suficiente para comprobar la lognormalidad de la variable.

TABLA 4. ESTADISTICAS DE LA VARIABLE ORO 1

MEDIA = 0.47656

VALOR MINIMO = 0.00

VARIANZA = 0.28760

VALOR MAXIMO = 5.00

NUMERO DE DATOS CONSIDERADOS = 1210

AMPLITUD DE CLASE = 0.27781

NUMERO DE CLASES = 18

| CLASE | INTERVALO | FRECUENCIA | FRECUENCIA (%) |
|-------|---------------|------------|----------------|
| 1 | 0 - 0.278 | 512 | 42.31 |
| 2 | 0.278 - 0.556 | 391 | 32.31 |
| 3 | 0.556 - 0.833 | 141 | 11.65 |
| 4 | 0.833 - 1.111 | 67 | 5.54 |
| 5 | 1.111 - 1.389 | 36 | 2.98 |
| 6 | 1.389 - 1.667 | 17 | 1.40 |
| 7 | 1.667 - 1.945 | 14 | 1.16 |
| 8 | 1.945 - 2.222 | 11 | 0.91 |
| 9 | 2.222 - 2.500 | 9 | 0.74 |
| 10 | 2.500 - 2.778 | 1 | 0.08 |
| 11 | 2.778 - 3.056 | 1 | 0.08 |
| 12 | 3.056 - 3.334 | 3 | 0.25 |
| 13 | 3.334 - 3.611 | 1 | 0.08 |
| 14 | 3.611 - 3.889 | 1 | 0.08 |
| 15 | 3.889 - 4.167 | 1 | 0.08 |
| 16 | 4.167 - 4.445 | 2 | 0.17 |
| 17 | 4.445 - 4.723 | 0 | 0.00 |
| 18 | 4.723 - 5.000 | 2 | 0.17 |

HISTOGRAMA ORO 1

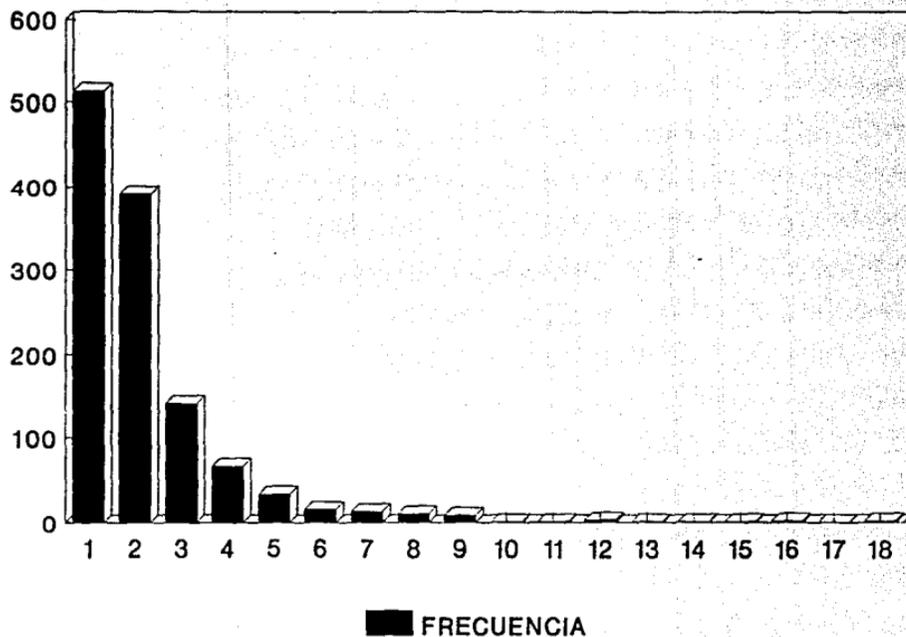


TABLA 5. ESTADISTICAS DE LA VARIABLE LOG ORO 1

MEDIA = 0.30443

VALOR MINIMO = 0.00

VALOR MAXIMO = 5.00

NUMERO DE DATOS CONSIDERADOS = 1208

NUMERO DE CLASES = 18

| CLASE | INTERVALO | FRECUENCIA | FRECUENCIA (%) |
|-------|---------------|------------|----------------|
| 1 | 0.010 - 0.014 | 6 | 0.50 |
| 2 | 0.014 - 0.020 | 0 | 0.00 |
| 3 | 0.020 - 0.028 | 13 | 1.08 |
| 4 | 0.028 - 0.040 | 12 | 0.99 |
| 5 | 0.040 - 0.056 | 30 | 2.48 |
| 6 | 0.056 - 0.079 | 34 | 2.81 |
| 7 | 0.079 - 0.112 | 99 | 8.20 |
| 8 | 0.112 - 0.158 | 82 | 6.79 |
| 9 | 0.158 - 0.224 | 127 | 10.51 |
| 10 | 0.224 - 0.316 | 178 | 14.74 |
| 11 | 0.316 - 0.446 | 191 | 15.81 |
| 12 | 0.446 - 0.630 | 181 | 14.98 |
| 13 | 0.630 - 0.890 | 103 | 8.53 |
| 14 | 0.890 - 1.257 | 77 | 6.37 |
| 15 | 1.257 - 1.775 | 33 | 2.73 |
| 16 | 1.775 - 2.507 | 30 | 2.48 |
| 17 | 2.507 - 3.540 | 6 | 0.50 |
| 18 | 3.540 - 5.000 | 6 | 0.50 |

HISTOGRAMA LOG ORO 1

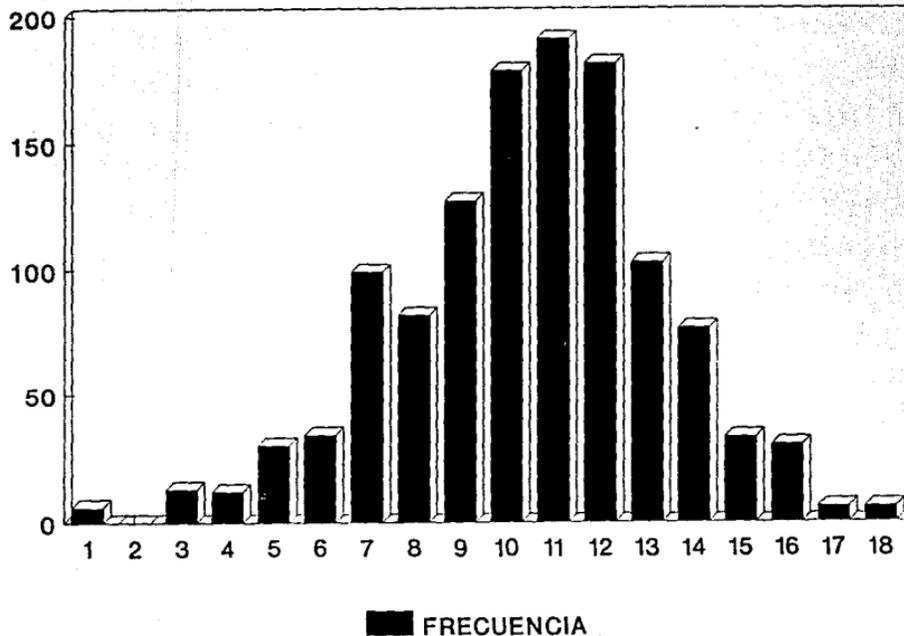
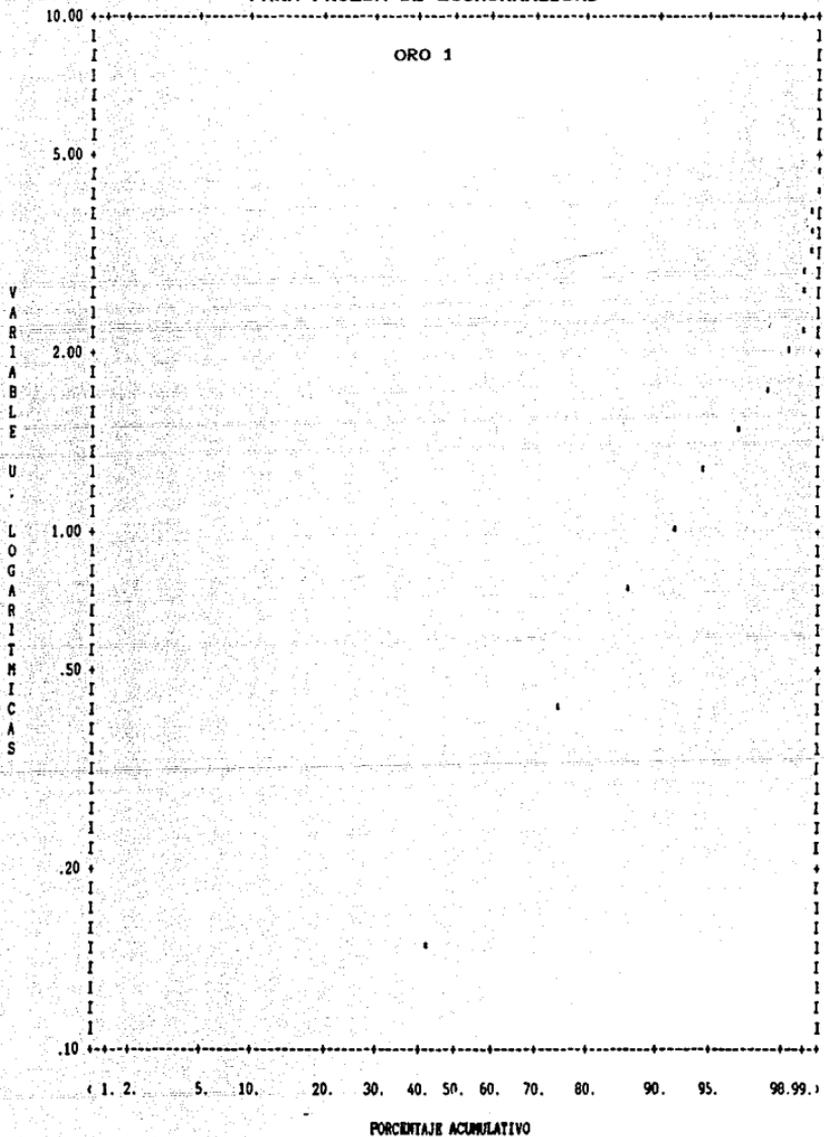


FIGURA 6. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD



Las tablas y figuras del análisis estadístico para las variables ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE se encuentran en el Anexo Estadístico, al final de la tesis.

A continuación se presentan las estadísticas principales de cada una de las variables mencionadas:

VARIABLE: ORO 1

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| Valor mínimo: | 0.00 g/ton | |
| Valor máximo: | 5.00 g/ton | |
| Distribución: | LOGNORMAL | |
| | Aritmética | Geométrica |
| Media: | 0.4765 | 0.3044 |
| Varianza: | 0.2876 | -- |
| Desviación estándar: | 0.5362 | -- |

VARIABLE: ORO 2

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| Valor mínimo: | 0.00 g/ton | |
| Valor máximo: | 5.00 g/ton | |
| Distribución: | LOGNORMAL | |
| | Aritmética | Geométrica |
| Media: | 0.4711 | 0.3017 |
| Varianza: | 0.2810 | -- |
| Desviación estándar: | 0.5300 | -- |

VARIABLE: ORO PROMEDIO

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| Valor mínimo: | 0.00 g/ton | |
| Valor máximo: | 5.00 g/ton | |
| Distribución: | LOGNORMAL | |
| | Aritmética | Geométrica |
| Media: | 0.4738 | 0.3062 |
| Varianza: | 0.2777 | -- |
| Desviación estándar: | 0.5269 | -- |

VARIABLE: PLATA

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| Valor mínimo: | 0.00 g/ton | |
| Valor máximo: | 232 g/ton | |
| Distribución: | LOGNORMAL | |
| | Aritmética | Geométrica |
| Media: | 13.789 | 8.953 |
| Varianza: | 345.18 | -- |
| Desviación estándar: | 18.57 | -- |

VARIABLE: PLOMO

Valor mínimo: 31 g/ton
Valor máximo: 18,000 g/ton
Distribución: LOGNORMAL

| | Aritmética | Geométrica |
|----------------------|------------|------------|
| Media: | 1466.20 | 971.65 |
| Varianza: | 2,338,800 | -- |
| Desviación estándar: | 1529.31 | -- |

VARIABLE: EINC

Valor mínimo: 0.00 g/ton
Valor máximo: 99,999 g/ton
Distribución: LOGNORMAL

| | Aritmética | Geométrica |
|----------------------|------------|------------|
| Media: | 5440.90 | 2470.55 |
| Varianza: | 58,350,000 | -- |
| Desviación estándar: | 7638.87 | -- |

VARIABLE: COBRE

Valor mínimo: 1.00 g/ton
Valor máximo: 22,400 g/ton
Distribución: LOGNORMAL

| | Aritmética | Geométrica |
|----------------------|------------|------------|
| Media: | 118.28 | 51.46 |
| Varianza: | 547,710 | -- |
| Desviación estándar: | 740.07 | -- |

De este análisis estadístico se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. La cantidad de datos disponibles (1210) resultó suficiente para caracterizar la distribución que presenta cada una de las variables.
2. Debido a que las muestras son de espesor constante no fue posible hacer un análisis de las variables (ancho x ley) ni tener un conocimiento de la acumulación (producto espesor x ley) de estos elementos.
3. Las variables "ORO" están caracterizadas por la presencia de un número mayor de valores bajos a medios que de valores medios a altos, es decir, las tres variables presentan una distribución lognormal. Para las tres variables, el 90% de las muestras tienen una ley entre 0 y 1 g, y el resto de las muestras entre 1 y 5 g.

4. La media y la varianza de las tres variables son entre sí muy semejantes y considerando sólo las dos primeras cifras significativas, resultan iguales.
5. Para efectuar el cálculo de reservas se eligió a la variable ORO PROMEDIO por tener esta un comportamiento más regular y más cercano a la distribución normal. Esto se puede ver al comparar cualitativamente los histogramas LOG ORO 1, LOG ORO 2 y LOG ORO PROMEDIO. Sin embargo, se obtendrían los mismos resultados si la evaluación se efectuara con los datos de las variables ORO 1 u ORO 2.
6. La variable PLATA presenta un comportamiento en el que más del 85% de los valores de las muestras está contenidos en las dos primeras clases.
7. El histograma de la variable LOG PLATA no se ajusta muy bien a la curva normal (como prueba de lognormalidad), sin embargo, tiende más a una distribución lognormal que a una de tipo normal. Su comportamiento lognormal está comprobado en la gráfica de prueba de lognormalidad.
8. Las variables PLOMO, ZINC y COBRE tienen todas ellas una distribución estadística lognormal.
9. Los valores muy bajos de estas variables, reflejados en el análisis estadístico, hacen a estas de poco o ningún interés económico, por lo que el cálculo de reservas no se efectuó para estas variables.

V. EVALUACION GEOESTADISTICA

Este capítulo consta de cuatro subtemas, los tres primeros son propios de la metodología para una evaluación geoestadística - análisis estructural, cálculo de reservas y distribución geográfica de los valores - y el cuarto subtema se ocupa de una de las aplicaciones prácticas de la Geoestadística, que es el diseño de la estrategia óptima de exploración.

Cada uno de los subtemas contiene la base filosófica y los conceptos básicos en los que se apoya, el análisis efectuado y los resultados obtenidos.

V.1 INTRODUCCION.

La Geoestadística fue definida por George Matheron (1962) como la aplicación de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales (Berlanga, J.M., y Obregón, J.J., 1981).

La Geoestadística es una técnica alternativa en la estimación de reservas, considerada superior a otras técnicas debido a que genera una inferencia del error asociado a la estimación.

Esa superioridad que la Geoestadística tiene para dar una medida de la confiabilidad de las estimaciones, está fundamentada en el análisis de la variabilidad espacial del fenómeno, análisis en que esta técnica se apoya.

El hecho de que esta técnica genere una inferencia del error en las estimaciones, hace posible que puedan tomarse fuertes decisiones económicas concernientes a la exploración y explotación. En la exploración porque permite determinar el esquema de muestreo que optimice la información sin necesidad de efecuar físicamente ningún muestreo y en la explotación porque permite decidir sobre la factibilidad de explotar el depósito.

V.2 ANALISIS ESTRUCTURAL.

La premisa básica de la Geoestadística es considerar que las variables de fenómenos naturales (como puede ser un yacimiento mineral) presentan dos aspectos: uno aleatorio y otro espacial o estructural.

El aspecto aleatorio significa que la magnitud de la variable en un lugar de la región (depósito) es independiente de los valores obtenidos por muestras cercanas.

El aspecto espacial o estructural, mediante el cual la variación que existe entre muestras separadas por alguna distancia es una medida de su correlación espacial, es decir, se asume que muestras más cercanas están correlacionadas entre sí.

Con las siguientes palabras Berlanga, J.M., y Obregón, J.J., (1981) resaltan la importancia de lo anterior: "...en el proceso de los fenómenos naturales la mineralización no es tan caótica como para anular cualquier método de estimación, ni lo suficientemente regular como para permitir el empleo de métodos determinísticos. Es por ello, que toda estimación realista debe necesariamente tomar en cuenta ambos aspectos, el estructural y el aleatorio...".

El análisis estructural consiste en el ajuste de una función denominada semivariograma a la variabilidad espacial de un fenómeno natural, es decir consiste en el cálculo y modelado de los semivariogramas.

Esto es, el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste de un modelo o semivariograma teórico al experimental con el objeto de tener una representación matemática del fenómeno natural en estudio.

El semivariograma es la única vía simple para verificar la aplicabilidad de la Geostatística al depósito en cuestión.

La construcción del semivariograma es el paso más importante en una estimación geostatística, debido a que el modelo elegido va a ser usado en el proceso del kriging y va a influenciar todos los resultados y conclusiones.

V.2.1 CONCEPTOS BASICOS.

El semivariograma se define como la varianza de la diferencia de dos variables aleatorias regionalizadas, separadas una de la otra por una distancia h.

La expresión matemática del semivariograma experimental es:

$$\gamma^*(h) = 1/2 N \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

donde:

N = número de pares de datos formados con el vector h,

$z(x_i)$ = Es el valor de la variable en la posición x_i ,

$z(x_i+h)$ = Es el valor de la variable en la posición x_i+h , y

h = es la distancia de separación entre cada par de variables.

ANATOMIA DEL SEMIVARIOGRAMA.

Debido a que la construcción del semivariograma es el paso más importante en una estimación geostatística, es indispensable

conocer su anatomía y entender su significado físico:

1. La discontinuidad al origen o efecto pepita (C_0) puede provenir de la existencia de microestructuras que tienen un rango inferior al tamaño de las muestras o a errores en el muestreo (secuencia de operaciones que van desde la extracción de la muestra hasta su preparación para laboratorio). El efecto pepita es una variación que no puede ser predicha por ningún método.
2. La continuidad y regularidad de los valores están representadas por el mayor o menor comportamiento regular del semivariograma cerca del origen.
3. El incremento más o menos rápido del semivariograma refleja la proporción del deterioro de la influencia de una muestra sobre su vecindad y el mayor o menor grado de variabilidad o continuidad de la mineralización.
4. En el caso de fenómenos de transición, el semivariograma alcanza un sill (C) para una distancia superior a a ; esta distancia a significa la zona de influencia de una muestra. Así, muestras que distan de $h < a$ van a poder correlacionarse y aquellas que distan $h > a$ van a ser independientes entre sí.
5. En la construcción de un semivariograma la distancia entre los pares de puntos se incrementa y generalmente son cada vez menos los pares que entran en el cálculo. Esto implica que aquellos puntos más cercanos al origen de la gráfica van a ser más confiables que aquellos que se encuentran a distancias mayores; esta consideración debe tomarse en cuenta en la interpretación del semivariograma. Físicamente, esto significa que desde el momento que se efectúa un muestreo discontinuo (toma de muestras separadas) se obtiene una imagen imperfecta de la ley de dispersión teórica de los valores de la variable en estudio.
6. El semivariograma puede estar fuertemente influenciado por la orientación de los datos. Por ello es necesario construir semivariogramas en diferentes direcciones (según lo permita la información disponible) y decidir si las variaciones entre los semivariogramas para las distintas direcciones representan diferencias en la naturaleza deposicional del yacimiento (anisotropías) o si son variaciones puramente estadísticas que resultan de un bajo número de muestras.
7. El semivariograma no representa en su totalidad los detalles locales del fenómeno, sólo expresa, en forma sintética, sus características esenciales.

MODELOS DE SEMIVARIOGRAMAS.

Para la interpretación de un semivariograma experimental se hace uso de los modelos de semivariogramas teóricos. El objeto de ajustar un modelo teórico al semivariograma experimental es el

tener a este expresado mediante una fórmula matemática representativa del fenómeno o depósito en estudio.

Los parámetros descriptivos de esta fórmula son obtenidos a partir del modelo que mejor se ajusta al semivariograma experimental.

El modelo elegido y sus parámetros descriptivos serán empleados en la etapa de cálculo de reservas.

Los modelos teóricos que se emplean en el ajuste de los semivariogramas experimentales se dividen en dos grupos:

1) Modelos con meseta.

2) Modelos sin meseta.

1) Modelos con meseta (sill):

a) Modelo esférico o de Matheron.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 (1.5(h/a) - 0.5(h/a)^3) \quad \text{Para } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 = C \quad \text{Para } h \geq a$$

b) Modelo exponencial.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 (1 - e^{-h/a})$$

donde:

C_0 = Efecto pepita

C = Meseta o sill

C_1 = Sill - efecto pepita

a = Rango de influencia

h = Distancia de separación entre cada par de variables

c) Modelo Gaussiano.

$$\gamma(h) = 1 - e^{-(h/a)^2}$$

2) Modelos sin meseta.

a) Modelo lineal.

$$\gamma(h) = ph \quad \text{donde } p = \text{pendiente}$$

b) De Wijsian.

$$\gamma(h) = 3\alpha \log(h) \quad \text{donde } \alpha = \text{coeficiente de dispersión}$$

V.2.2 CONSTRUCCION Y ANALISIS DE SEMIVARIOGRAMAS.

El análisis estructural consiste en el cálculo y modelado de los semivariogramas.

Cada una de las variables analizadas: ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE presentan una distribución lognormal, por lo que los semivariogramas experimentales fueron calculados utilizando el logaritmo respectivo de cada una de las variables.

Además, dada la distribución espacial de la información los semivariogramas experimentales fueron calculados solamente para la dirección vertical a espaciamientos múltiples de 2.03 m, ya que las muestras están equiespaciadas a esta distancia.

Los semivariogramas experimentales no fueron calculados en direcciones sobre el plano horizontal ya que al hacerlo el número de pares de datos se hubiera reducido considerablemente y probablemente se hubieran obtenido anisotropías derivadas de un bajo número de muestras, por lo que los semivariogramas sólo fueron calculados para la dirección vertical.

En la tabla 6 se describe el número de pares de datos formados, el semivariograma experimental y teórico para cada una de las distancias para las cuales se calculó el semivariograma de la variable LOG ORO 1. Ver el Anexo Estructural, al final de la tesis, para las tablas correspondientes a las demás variables.

En las figuras 7 y 8 se presentan los semivariogramas experimental y teórico respectivamente, para la variable LOG ORO 1, para las demás variables ver el Anexo Estructural.

Los resultados obtenidos de este análisis estructural son los siguientes:

1. La forma general que se obtuvo en cada uno de los semivariogramas experimentales construidos es la de una curva dentada que en general tiende a crecer a medida que aumenta la distancia respecto al origen, tendiendo posteriormente a estabilizarse alrededor de una meseta; pudiendo ser ajustados a un modelo del tipo de transición.
2. Los semivariogramas experimentales de las variables LOG ORO 1, LOG ORO 2 y LOG ORO PROMEDIO fueron ajustados a un modelo esférico.
3. Los parámetros estructurales encontrados para estas variables son los siguientes:

| VARIABLE | C ₀ | C ₁ | C | a |
|------------------|----------------|----------------|------|----|
| LOG ORO 1 | 0.54 | 0.51 | 1.05 | 65 |
| LOG ORO 2 | 0.54 | 0.46 | 1.00 | 65 |
| LOG ORO PROMEDIO | 0.50 | 0.50 | 1.00 | 60 |

TABLA 6. ESTADISTICAS DEL SEMIVARIOGRAMA LOG ORO 1

DIRECCION:

ESTADISTICAS:

LONGITUD = 0.00

MEDIA = 0.30621

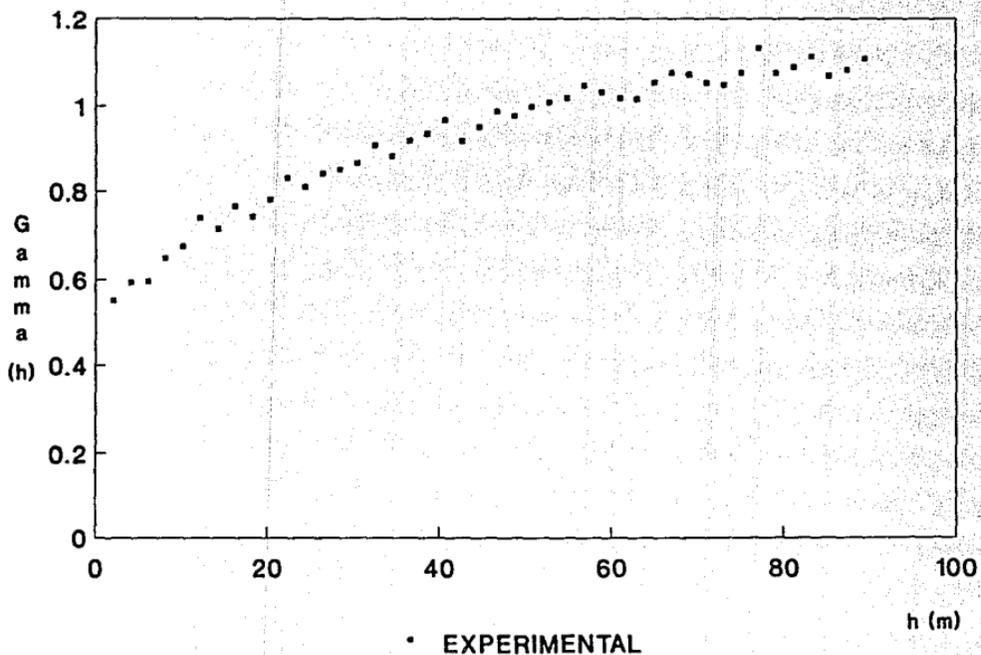
LATITUD = 90.00

NUMERO DE DATOS CONSIDERADOS = 1185

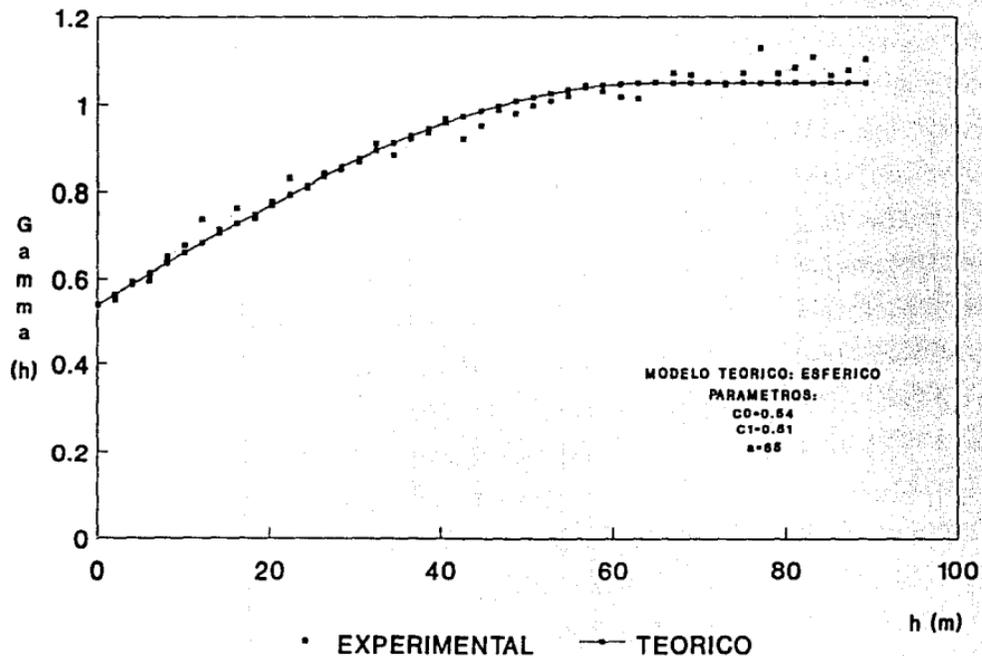
| INTERVALO | NUMERO DE PARES | DISTANCIA | SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL | SEMIVARIOGRAMA TEORICO |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 0 | 0.00 | 0.0000 | 0.5400 * |
| 2 | 1165 | 2.03 | 0.5519 | 0.5638 |
| 3 | 1142 | 4.06 | 0.5930 | 0.5877 |
| 4 | 1131 | 6.09 | 0.5961 | 0.6114 |
| 5 | 1111 | 8.12 | 0.6498 | 0.6350 |
| 6 | 1095 | 10.15 | 0.6746 | 0.6584 |
| 7 | 1081 | 12.18 | 0.7386 | 0.6816 |
| 8 | 1060 | 14.21 | 0.7135 | 0.7045 |
| 9 | 1042 | 16.24 | 0.7640 | 0.7271 |
| 10 | 1027 | 18.27 | 0.7406 | 0.7494 |
| 11 | 1009 | 20.30 | 0.7787 | 0.7711 |
| 12 | 992 | 22.33 | 0.8296 | 0.7924 |
| 13 | 976 | 24.36 | 0.8090 | 0.8132 |
| 14 | 958 | 26.39 | 0.8387 | 0.8335 |
| 15 | 943 | 28.42 | 0.8484 | 0.8531 |
| 16 | 930 | 30.45 | 0.8664 | 0.8721 |
| 17 | 910 | 32.48 | 0.9064 | 0.8904 |
| 18 | 892 | 34.51 | 0.8817 | 0.9079 |
| 19 | 877 | 36.54 | 0.9175 | 0.9247 |
| 20 | 860 | 38.57 | 0.9325 | 0.9406 |
| 21 | 843 | 40.60 | 0.9660 | 0.9556 |
| 22 | 828 | 42.63 | 0.9168 | 0.9697 |
| 23 | 813 | 44.66 | 0.9490 | 0.9829 |
| 24 | 795 | 46.69 | 0.9861 | 0.9949 |
| 25 | 778 | 48.72 | 0.9766 | 1.0060 |
| 26 | 762 | 50.75 | 0.9967 | 1.0159 |
| 27 | 746 | 52.78 | 1.0070 | 1.0246 |
| 28 | 730 | 54.81 | 1.0180 | 1.0321 |
| 29 | 715 | 56.84 | 1.0440 | 1.0384 |
| 30 | 700 | 58.87 | 1.0290 | 1.0434 |
| 31 | 685 | 60.90 | 1.0170 | 1.0470 |
| 32 | 669 | 62.93 | 1.0130 | 1.0492 |
| 33 | 653 | 64.96 | 1.0510 | 1.0500 |
| 34 | 640 | 66.99 | 1.0730 | 1.0500 |
| 35 | 625 | 69.02 | 1.0680 | 1.0500 |
| 36 | 610 | 71.05 | 1.0500 | 1.0500 |
| 37 | 597 | 73.08 | 1.0460 | 1.0500 |
| 38 | 583 | 75.11 | 1.0720 | 1.0500 |
| 39 | 569 | 77.14 | 1.1290 | 1.0500 |
| 40 | 555 | 79.17 | 1.0720 | 1.0500 |

* Valor correspondiente al efecto pepita ajustado

SEMIVARIOGRAMA LOG ORO 1



SEMIVARIOGRAMA LOG ORO 1



4. La variabilidad espacial a "distancias cortas", para estas variables resultó ser grande, del orden de 0.5 (unidades logarítmicas).
5. El comportamiento estructural de las tres variables (LOG ORO 1, LOG ORO 2 y LOG ORO PROMEDIO) es muy semejante, lo que confirma que se obtendrá la misma evaluación empleando cualquiera de las tres variables.
6. Para las variables LOG PLATA y LOG PLOMO el semivariograma experimental de cada una fue ajustado a la suma de dos modelos de tipo esférico. Los parámetros estructurales para estas variables son los siguientes:

| VARIABLE | C ₀ | C ₁ | C ₂ | C | a ₁ | a ₂ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|-------|----------------|----------------|
| LOG PLATA | 0.375 | 0.345 | 0.155 | 0.875 | 26.00 | 52.00 |
| LOG PLOMO | 0.425 | 0.295 | 0.185 | 0.905 | 32.00 | 61.00 |

7. Los semivariogramas experimentales de las variables LOG ZINC y LOG COBRE fueron ajustados a un modelo de tipo esférico. Sus parámetros estructurales son los siguientes:

| VARIABLE | C ₀ | C ₁ | C | a |
|-----------|----------------|----------------|------|----|
| LOG ZINC | 0.35 | 1.24 | 1.59 | 75 |
| LOG COBRE | 0.35 | 0.34 | 0.69 | 45 |

8. Las variables LOG ZINC y LOG COBRE presentan respectivamente el mayor y el menor rango de influencia a de todas las variables consideradas.
9. Si se considera que el rango de correlación de las muestras en la dirección vertical es de 60 m para la variable "ORO" y que la distancia promedio entre los barrenos es de 80 m, quizá los semivariogramas experimentales de las direcciones horizontales consistirían prácticamente de un efecto pepita puro (en caso de haberse podido calcular).

V.3 KRIGEAGE.

V.3.1 INTRODUCCION.

Generalizando, raramente la totalidad de los recursos in-situ de un cuerpo mineralizado pueden ser explotados de una manera no selectiva, por lo que deben estudiarse varias posibilidades de selección para así poder juzgar la viabilidad de trabajar el yacimiento entero o parte de él, en forma tal de llegar al mejor método de explotación y aprovechamiento de ese yacimiento (Obregón, s/f).

Es en tal situación cuando nos vemos frente a la tarea de seleccionar bloques de reservas minerales para separar aquéllas económicas de aquéllas que no lo son.

La estimación de reservas es una de las tareas más difíciles que frecuentemente enfrentan los ingenieros geólogos y de minas, por lo que se han visto en la necesidad de generar y aplicar técnicas cada vez más confiables que les permitan realizar sus estimaciones con la mayor certeza posible, una de estas técnicas es el krigeage.

V.3.2 CONCEPTOS BASICOS.

KRIGEAGE.

El krigeage es una técnica de estimación local cuyo objetivo es encontrar el mejor estimador lineal insesgado de las características desconocidas del fenómeno en estudio.

El krigeage se lleva a cabo asignándole factores de peso a cada uno de los datos disponibles, dependiendo las magnitudes de dichos factores de los parámetros geoestadísticos del depósito y de la particular geometría de las muestras en relación con el bloque bajo cálculo. Estos factores de peso deben ser obtenidos de tal forma que el estimador sea insesgado y la varianza de estimación sea minimizada.

FORMULACION MATEMATICA.

Sea un depósito D en el cual los valores de las muestras tienen una distribución normal, entonces el valor desconocido μ_v de un bloque del depósito D estará normalmente distribuido.

Así, el objetivo es estimar el valor medio de la variable regionalizada μ_v mediante el estimador lineal:

$$\mu_v^* = c + \sum_{b=1}^n b_i x_i$$

Para satisfacer la condición de insesgamiento se impone la condición que:

$$\sum_{i=1}^n b_i = 1$$

ya que sólo así se garantiza que el valor esperado de μ_v sea igual al valor esperado de μ_v^* , es decir:

$$E(\mu_v^*) = E(\sum b_i \mu_v) = \sum b_i E(\mu_v) = \sum b_i \mu_v = \mu_v = E(\mu_v)$$

Si los valores de las muestras de un depósito tienen una distribución lognormal el valor μ_w de un bloque del depósito será estimado mediante un estimador log-lineal μ_w^* el cual satisficará la siguiente ecuación:

$$\ln \mu_w^* = C + \sum_{i=1}^n b_i \ln x_i$$

El estimador log-lineal μ_w^* estará dado por:

$$\mu_w^* = \exp(C + \sum_{i=1}^n b_i \ln x_i)$$

expresiones en las que:

- b_i = es el peso dado a la muestra i -ésima
- x_i = es el valor de la i -ésima muestra
- C = constante
- n = número de muestras consideradas en la estimación.

Los pesos de influencia óptimos se obtienen a partir del llamado "Sistema de Ecuaciones del Krigeage", cuya expresión es:

$$\sum w_i \gamma(S_i, S_j) + \mu = \gamma(S_i, P) \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\sum w_i = 1$$

y la varianza del krigeage mediante la fórmula:

$$\sigma_k^2 = \sum w_i \gamma(S_i, P) + \mu - \gamma(P, P)$$

donde:

$\gamma(S_i, S_j)$ = variabilidad de la muestra S_i con respecto a sí misma y todas las demás muestras

$\gamma(S_i, P)$ = variabilidad de las muestras S_i con el bloque P

$\gamma(P, P)$ = variabilidad del bloque consigo mismo

μ = multiplicador de Lagrange.

Cabe resaltar que los pesos de influencia de las muestras y la varianza del krigage dependen del modelo estructural $\gamma(h)$, de la geometría (posiciones) de las muestras, de la geometría del bloque a estimar y de las interrelaciones entre ambas geometrías, pero NO DEPENDEN de los valores particulares de los datos.

CONSERVACION DE LOGNORMALIDAD.

La conservación de la lognormalidad establece que si los valores de las muestras están lognormalmente distribuidos, entonces el valor promedio de un número de muestras, tal como el valor promedio de un bloque, es una variable también con distribución lognormal.

Pero la hipótesis de conservación de lognormalidad es estadísticamente inválida ya que la distribución de probabilidad de una combinación lineal de variables lognormales no es lognormal.

Sin embargo, en la práctica se ha observado y verificado la conservación de lognormalidad al menos para bloques pequeños (en términos de los parámetros del semivariograma). La explicación a esto es que para bloques pequeños los valores de las muestras dentro del bloque están altamente correlacionados (asumiendo la ausencia de efecto pepita) y consecuentemente el promedio de los valores de estas muestras va a tener una distribución muy similar a la distribución de un valor individual (Taylor, 1982).

V.3.3 CALCULO DE RESERVAS.

El cálculo de reservas sólo se efectuó para las variables ORO y PLATA, ya que los otros elementos presentan leyes no económicas, según se discutió en el análisis estadístico.

El método geostatístico empleado en el cálculo de reservas fue el krigage lognormal, debido a que ambas variables presentan una distribución de probabilidad lognormal.

Para la variable ORO el cálculo de reservas se hizo considerando los datos y parámetros estadístico-estructurales de la variable ORO PROMEDIO, por las razones explicadas en el análisis estadístico.

Para efectuar el cálculo de reservas primero se llevó a cabo la configuración del cuerpo intrusivo, la cual se hizo por niveles o bancos a cada 10 m, configurándose el cuerpo desde el nivel 2110 hasta el nivel 1840, es decir, se formaron 27 bancos para su evaluación (Figura 9).

La limitación del cuerpo en sus bordes fue hecha con base en la distribución de la información disponible y en el rango de influencia obtenido en el análisis estructural, es decir, a pesar de existir una mayor extensión del cuerpo, este fue limitado en sus extremos por el rango de influencia de las muestras de los barrenos más externos.

Una vez configurado el cuerpo y para efectos de evaluación, cada uno de los niveles fue subdividido en superbloques cuyas dimensiones máximas fueron de 100 m x 100 x 10 m y estos a su vez fueron divididos en bloques de 10 m x 10 m x 10 m. Estos bloques de 10 m por lado constituyeron la unidad básica de evaluación.

La razón de esta subdivisión fue formar unidades mínimas más pequeñas, de las que pudiera obtenerse información de su ley a efecto de emplearla en la etapa del diseño de tajo y en la estrategia de explotación.

Para realizar el cálculo de reservas fue necesario construir un ARCHIVO DE CONTORNOS que contiene las coordenadas que delimitan a cada uno de los superbloques que constituyen cada uno de los niveles, este archivo contiene además otros parámetros que requiere el programa de cómputo KRIG3D para el cálculo de reservas (Tabla 7).

Una condición asumida durante la evaluación fue la de considerar la existencia de por lo menos cinco muestras dentro del rango de influencia para cada bloque, a efecto de tener un mayor control en la confiabilidad de las estimaciones, permitiendo que el error máximo asociado sea aquel que se produce al evaluar con sólo cinco muestras.

Para el cálculo de reservas se hizo la suposición de la conservación de lognormalidad, al considerar que los bloques de 10 m por lado (bloques pequeños en términos del semivariograma) guardan las características de las muestras altamente correlacionadas con las que fueron evaluados.

La información requerida por el programa KRIG3D para el cálculo de reservas es la siguiente:

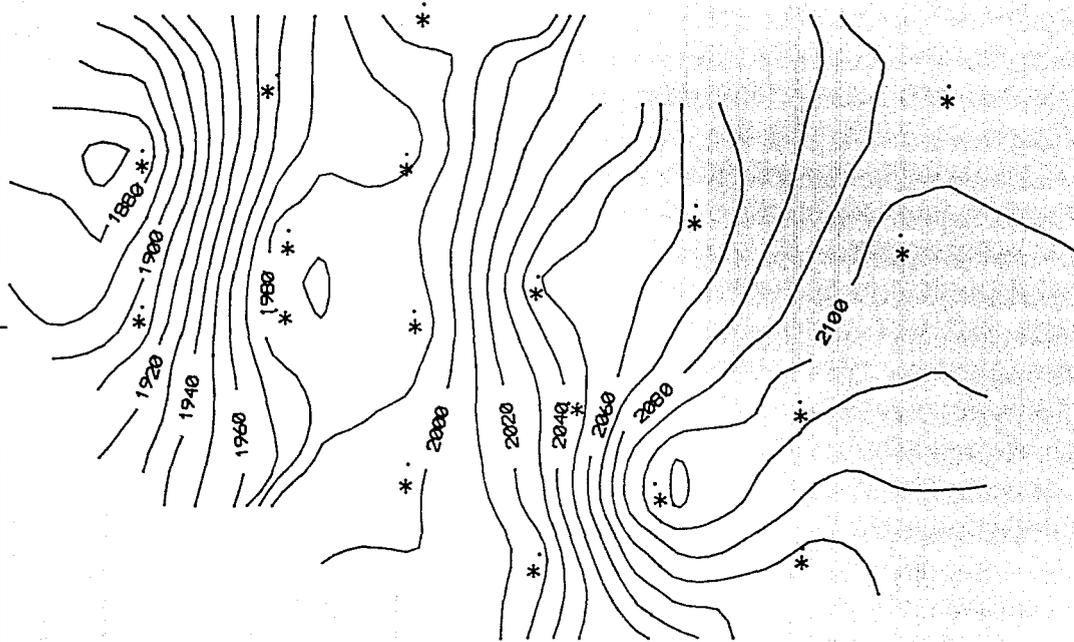
- Archivo de datos (Archivo Oro y Archivo Metálico).
- Archivo de Contornos.
- Información estadística de la variable (distribución estadística y media de la población).
- Información estructural de la variable (modelo ajustado, efecto pepita, sill - efecto pepita y el rango de influencia).

11400 4700

5400

11400

AREA POTENCIAL DE EXPLORACION



EXPLICACION

-  CURVA DE NIVEL
-  BARRENO

AREA POTENCIAL DE EXPLORACION

10000 4700

5400

10000

| | | | |
|------------------------|--|----------|--|
| UNAM | FACULTAD DE INGENIERIA | | |
| | INGENIERO GEOLOGO | | |
| | TESIS PROFESIONAL | | |
| | CONFIGURACION TOPOGRAFICA DEL CUERPO IGNEO Y LOCALIZACION DE LOS BARRENOS | | |
| RICARDO GARCIA COLLAZO | | | |
| CROQUIS | MAYO 88 | FIGURA 9 | |

TABLA 7. ARCHIVO DE CONTORNOS

| | | | | | | | | |
|---------|----------|----|---|---|---|---|---------|------|
| 1.5 | 8 | 7 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2105.00 | 0.00 |
| 5110.00 | 10590.00 | | | | | | | |
| 5110.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 5180.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 5180.00 | 10590.00 | | | | | | | |
| 5160.00 | 10590.00 | | | | | | | |
| 5160.00 | 10580.00 | | | | | | | |
| 5120.00 | 10580.00 | | | | | | | |
| 5120.00 | 10590.00 | | | | | | | |
| 1.000 | | | | | | | | |
| 2.5 | 14 | 9 | 4 | 1 | 1 | 1 | 2105.00 | 0.00 |
| 5110.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 5110.00 | 10610.00 | | | | | | | |
| 5120.00 | 10610.00 | | | | | | | |
| 5120.00 | 10620.00 | | | | | | | |
| 5140.00 | 10620.00 | | | | | | | |
| 5140.00 | 10630.00 | | | | | | | |
| 5170.00 | 10630.00 | | | | | | | |
| 5170.00 | 10640.00 | | | | | | | |
| 5200.00 | 10640.00 | | | | | | | |
| 5200.00 | 10620.00 | | | | | | | |
| 5190.00 | 10620.00 | | | | | | | |
| 5190.00 | 10610.00 | | | | | | | |
| 5180.00 | 10610.00 | | | | | | | |
| 5180.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 1.000 | | | | | | | | |
| 3.6 | 10 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 2105.00 | 0.00 |
| 5260.00 | 10720.00 | | | | | | | |
| 5260.00 | 10730.00 | | | | | | | |
| 5270.00 | 10730.00 | | | | | | | |
| 5270.00 | 10740.00 | | | | | | | |
| 5280.00 | 10740.00 | | | | | | | |
| 5280.00 | 10760.00 | | | | | | | |
| 5290.00 | 10760.00 | | | | | | | |
| 5290.00 | 10730.00 | | | | | | | |
| 5280.00 | 10730.00 | | | | | | | |
| 5280.00 | 10720.00 | | | | | | | |
| 1.000 | | | | | | | | |
| 1.5 | 12 | 10 | 4 | 1 | 1 | 1 | 2095.00 | 0.00 |
| 5100.00 | 10580.00 | | | | | | | |
| 5100.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 5200.00 | 10600.00 | | | | | | | |
| 5200.00 | 10580.00 | | | | | | | |
| 5190.00 | 10580.00 | | | | | | | |
| 5190.00 | 10570.00 | | | | | | | |
| 5160.00 | 10570.00 | | | | | | | |
| 5160.00 | 10560.00 | | | | | | | |
| 5140.00 | 10560.00 | | | | | | | |
| 5140.00 | 10570.00 | | | | | | | |
| 5110.00 | 10570.00 | | | | | | | |
| 5110.00 | 10580.00 | | | | | | | |

La información generada para cada bloque en la evaluación es la siguiente:

- Número de superbloque.
- Bloques programados a krigear.
- Dimensiones de los bloques.
- Variable evaluada.
- Coordendas (x,y,z).
- Ley promedio.
- Error relativo asociado a la estimación.
- Número de muestras consideradas en la evaluación.
- Contenido en kg (toneladas x ley).
- Tonelaje.

En la misma salida de la computadora, también se proporciona la siguiente información:

- Ley promedio para el superbloque.
- Error relativo promedio para el superbloque.
- Número de bloques krigeados respecto de los originalmente programados para ser evaluados.
- Contenido total en kg del superbloque.
- Tonelaje total del superbloque.

En las tablas 8 y 9, se presenta respectivamente una salida típica de evaluación para ORO y PLATA para un mismo banco. Como se puede ver, existe una diferencia entre ambas evaluaciones en el número de bloques evaluados, esto se debe a que el rango de influencia de las muestras para la variable ORO es mayor que para variable la PLATA, haciendo posible evaluar un mayor número de bloques para la primera.

Además del cálculo global de reservas se obtuvo una tabla de recuperables. Estas tablas presentan la gran ventaja de que uno puede seleccionar una ley de corte cualquiera y en forma automática obtendrá tanto el tonelaje a explotar como la ley promedio de los bloques que cumplan con la restricción establecida sin la necesidad de efectuar cálculos extras.

Se preparó una tabla de recuperables para cada variable en donde los resultados están en función de la ley de corte, haciendo variar esta desde 0.1 g hasta 1.5 g, en intervalos iguales de 0.1 g, para el ORO. Para la PLATA la ley de corte se hizo variar desde 2 g hasta 40 g en intervalos iguales de 2 g.

En ambas tablas de recuperables para cada ley de corte se proporciona el contenido en kg del metal, el tonelaje, la ley promedio sobre la ley de corte, el error relativo para la ley y para el tonelaje (Tablas 10 y 11).

La diferencia en el tonelaje evaluado para cada variable se debe a que el rango de influencia para la variable ORO, que fue 8 m mayor que el de la PLATA, permitió calcular un tonelaje mayor.

En las tablas 12 y 13 se presentan los tonelajes para cada uno de los bancos evaluados empleando una ley de corte de 0.5 g de oro y 16 g de plata, respectivamente.

TABLA 8. SALIDA DE EVALUACION PARA LA VARIABLE ORO

SUPERBLOQUE NUMERO 141.30
 NUMERO DE BLOQUES ORIGINALMENTE PROGRAMADOS A KRIGEAR: 100
 DIMENSIONES DE CADA BLOQUE: 10.00 M. POR 10.00 M. POR 10.00 M.

ORO

| | COORDENADAS (X,Y,Z) | | | LEY PROM. (U.O.) | DESV | # | LEY PROM. (GR.) | CONTENIDOS (KG.) | TONELAJE (TMS) | |
|---|---------------------|----------|---------|------------------|------------|------------|-----------------|------------------|----------------|------------|
| I | 4995.00 | 10525.00 | 1975.00 | 1 | 314346E+00 | 306715E+00 | 14 | 314346E+00 | 785866E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10535.00 | 1975.00 | 1 | 345066E+00 | 283616E+00 | 22 | 345066E+00 | 862664E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10545.00 | 1975.00 | 1 | 348329E+00 | 275395E+00 | 26 | 348329E+00 | 870822E+00 | 250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 399220E+00 | 284570E+00 | 23 | 399220E+00 | 998050E+00 | 250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 347823E+00 | 280048E+00 | 25 | 347823E+00 | 869558E+00 | 250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 347781E+00 | 279981E+00 | 25 | 347781E+00 | 869453E+00 | 250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 398960E+00 | 284425E+00 | 23 | 398960E+00 | 997399E+00 | 250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 287405E+00 | 306655E+00 | 14 | 287405E+00 | 718513E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10555.00 | 1975.00 | 1 | 348331E+00 | 275324E+00 | 26 | 348331E+00 | 870829E+00 | 250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 294538E+00 | 273327E+00 | 28 | 294538E+00 | 736346E+00 | 250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 318560E+00 | 266662E+00 | 30 | 318560E+00 | 796400E+00 | 250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 333674E+00 | 261494E+00 | 32 | 333674E+00 | 834185E+00 | 250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 333626E+00 | 261273E+00 | 32 | 333626E+00 | 834065E+00 | 250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 326178E+00 | 264965E+00 | 31 | 326178E+00 | 815446E+00 | 250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 294764E+00 | 272774E+00 | 28 | 294764E+00 | 736910E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10565.00 | 1975.00 | 1 | 367220E+00 | 248743E+00 | 46 | 367220E+00 | 918050E+00 | 250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 324768E+00 | 270773E+00 | 29 | 324768E+00 | 811921E+00 | 250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 333202E+00 | 259338E+00 | 32 | 333202E+00 | 833055E+00 | 250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 339867E+00 | 247561E+00 | 35 | 339867E+00 | 849667E+00 | 250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 350309E+00 | 240229E+00 | 36 | 350309E+00 | 875773E+00 | 250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 350029E+00 | 239724E+00 | 36 | 350029E+00 | 875072E+00 | 250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 339412E+00 | 246358E+00 | 35 | 339412E+00 | 848531E+00 | 250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 359832E+00 | 257077E+00 | 33 | 359832E+00 | 899580E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10575.00 | 1975.00 | 1 | 307522E+00 | 247114E+00 | 45 | 307522E+00 | 768806E+00 | 250000E+04 |
| I | 4915.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 304945E+00 | 275581E+00 | 27 | 304945E+00 | 762363E+00 | 250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 333416E+00 | 260306E+00 | 32 | 333416E+00 | 833539E+00 | 250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 338296E+00 | 243249E+00 | 35 | 338296E+00 | 845741E+00 | 250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 335232E+00 | 224480E+00 | 37 | 335232E+00 | 838079E+00 | 250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 321297E+00 | 209931E+00 | 38 | 321297E+00 | 803241E+00 | 250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 321212E+00 | 208792E+00 | 38 | 321212E+00 | 803030E+00 | 250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 322257E+00 | 221578E+00 | 39 | 322257E+00 | 805642E+00 | 250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 350279E+00 | 240178E+00 | 36 | 350279E+00 | 875697E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10585.00 | 1975.00 | 1 | 360198E+00 | 257588E+00 | 33 | 360198E+00 | 900495E+00 | 250000E+04 |
| I | 4905.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 269207E+00 | 296064E+00 | 18 | 269207E+00 | 673017E+00 | 250000E+04 |
| I | 4915.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 324696E+00 | 269800E+00 | 29 | 324696E+00 | 811740E+00 | 250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 355334E+00 | 251224E+00 | 34 | 355334E+00 | 888336E+00 | 250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 336148E+00 | 227455E+00 | 37 | 336148E+00 | 840369E+00 | 250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 310065E+00 | 196444E+00 | 39 | 310065E+00 | 775162E+00 | 250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 308393E+00 | 165311E+00 | 40 | 308393E+00 | 770983E+00 | 250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 308806E+00 | 162366E+00 | 40 | 308806E+00 | 772014E+00 | 250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 310534E+00 | 191659E+00 | 39 | 310534E+00 | 776334E+00 | 250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 322402E+00 | 223148E+00 | 38 | 322402E+00 | 806006E+00 | 250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10595.00 | 1975.00 | 1 | 339990E+00 | 247883E+00 | 35 | 339990E+00 | 849976E+00 | 250000E+04 |

PROMEDIOS .332174 .038652 43 .33 35.71 107500.00

TABLA 9. SALIDA DE EVALUACION PARA LA VARIABLE PLATA

SUPERBLOQUE NUMERO 141.30
 NUMERO DE BLOQUES ORIGINALMENTE PROGRAMADOS A KRIGEAR: 100
 DIMENSIONES DE CADA BLOQUE: 10.00 M. POR 10.00 M. POR 10.00 M.

PLATA

| | COORDENADAS (X, Y, Z) | | | LEY PROM. (U.O.) | DESV | # | LEY PROM. (GR.) | CONTENIDOS (KG.) | TOWELAJE (TMS) | | |
|---|-----------------------|----------|---------|------------------|-------------|-------------|-----------------|------------------|----------------|-------------|-------------|
| I | 4935.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .136767E+02 | .862757E+01 | 14 | I | .136767E+02 | .341918E+02 | .250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .176711E+02 | .793721E+01 | 23 | I | .176711E+02 | .441777E+02 | .250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .153436E+02 | .778732E+01 | 25 | I | .153436E+02 | .383591E+02 | .250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .154449E+02 | .773918E+01 | 26 | I | .154449E+02 | .386122E+02 | .250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .153706E+02 | .787682E+01 | 24 | I | .153706E+02 | .384266E+02 | .250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10565.00 | 1975.00 | I | .127032E+02 | .845464E+01 | 16 | I | .127032E+02 | .317580E+02 | .250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .129869E+02 | .829453E+01 | 18 | I | .129869E+02 | .324673E+02 | .250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .140817E+02 | .766211E+01 | 27 | I | .140817E+02 | .352043E+02 | .250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .143117E+02 | .735770E+01 | 30 | I | .143117E+02 | .357792E+02 | .250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .142377E+02 | .716484E+01 | 31 | I | .142377E+02 | .355942E+02 | .250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .142485E+02 | .715184E+01 | 31 | I | .142485E+02 | .356213E+02 | .250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .143352E+02 | .732861E+01 | 30 | I | .143352E+02 | .358380E+02 | .250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .141064E+02 | .763561E+01 | 27 | I | .141064E+02 | .352659E+02 | .250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10575.00 | 1975.00 | I | .132880E+02 | .808042E+01 | 21 | I | .132880E+02 | .332201E+02 | .250000E+04 |
| I | 4915.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .155993E+02 | .911797E+01 | 9 | I | .155993E+02 | .389982E+02 | .250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .154476E+02 | .772117E+01 | 26 | I | .154476E+02 | .386190E+02 | .250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .143954E+02 | .725130E+01 | 30 | I | .143954E+02 | .359884E+02 | .250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .156524E+02 | .671397E+01 | 33 | I | .156524E+02 | .391311E+02 | .250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .151258E+02 | .629848E+01 | 34 | I | .151258E+02 | .378144E+02 | .250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .151395E+02 | .626567E+01 | 34 | I | .151395E+02 | .378487E+02 | .250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .156602E+02 | .664595E+01 | 33 | I | .156602E+02 | .391505E+02 | .250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .142391E+02 | .716349E+01 | 31 | I | .142391E+02 | .355978E+02 | .250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10585.00 | 1975.00 | I | .140967E+02 | .764617E+01 | 27 | I | .140967E+02 | .352417E+02 | .250000E+04 |
| I | 4915.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .132884E+02 | .807991E+01 | 21 | I | .132884E+02 | .332210E+02 | .250000E+04 |
| I | 4925.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .142954E+02 | .745617E+01 | 29 | I | .142954E+02 | .357386E+02 | .250000E+04 |
| I | 4935.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .156424E+02 | .679549E+01 | 33 | I | .156424E+02 | .391060E+02 | .250000E+04 |
| I | 4945.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .151378E+02 | .590107E+01 | 35 | I | .151378E+02 | .378445E+02 | .250000E+04 |
| I | 4955.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .157426E+02 | .495371E+01 | 36 | I | .157426E+02 | .393565E+02 | .250000E+04 |
| I | 4965.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .157828E+02 | .486194E+01 | 36 | I | .157828E+02 | .394566E+02 | .250000E+04 |
| I | 4975.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .152084E+02 | .575895E+01 | 35 | I | .152084E+02 | .380209E+02 | .250000E+04 |
| I | 4985.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .156551E+02 | .668998E+01 | 33 | I | .156551E+02 | .391377E+02 | .250000E+04 |
| I | 4995.00 | 10595.00 | 1975.00 | I | .143444E+02 | .739531E+01 | 29 | I | .143444E+02 | .358611E+02 | .250000E+04 |

 PROMEDIOS 14.758110 1.291835 32 14.76 1180.65 80000.00

TABLA 10. TABLA DE RECUPERABLES PARA ORO

| LEY DE CORTE (G) | CONTENIDO (KG) | TONELAJE | LEY PROMEDIO (G) | DES. L.P. | DES. TON |
|---------------------|-------------------|----------|---------------------|-----------|-----------|
| 0.01 | 14683.240 | 42625000 | 0.344 | 0.002113 | 90059.400 |
| 0.10 | 14566.040 | 41027500 | 0.355 | 0.002128 | 87304.360 |
| 0.20 | 13146.820 | 32110000 | 0.409 | 0.002313 | 74268.530 |
| 0.30 | 10872.500 | 22750000 | 0.478 | 0.002667 | 60684.950 |
| 0.40 | 8048.838 | 14620000 | 0.551 | 0.003272 | 47833.740 |
| 0.50 | 4963.731 | 7767500 | 0.639 | 0.004430 | 34409.270 |
| 0.60 | 2693.188 | 3585000 | 0.751 | 0.006525 | 23390.420 |
| 0.70 | 1697.436 | 2040000 | 0.832 | 0.008716 | 17781.240 |
| 0.80 | 1004.742 | 1115000 | 0.901 | 0.011632 | 12970.150 |
| 0.90 | 389.602 | 385000 | 1.011 | 0.019623 | 7465.667 |
| 1.00 | 165.644 | 147000 | 1.123 | 0.032474 | 4265.344 |
| 1.10 | 68.756 | 55000 | 1.250 | 0.059846 | 2633.049 |
| 1.20 | 40.068 | 30000 | 1.335 | 0.085207 | 1913.900 |
| 1.30 | 24.731 | 17500 | 1.413 | 0.111268 | 1377.882 |
| 1.40 | 11.267 | 7500 | 1.502 | 0.178036 | 888.837 |
| 1.50 | 3.900 | 2500 | 1.560 | 0.309567 | 496.085 |

TABLA 11. TABLA DE RECUPERABLES PARA PLATA

| LEY DE CORTE (G) | CONTENIDO (KG) | TONELAJE | LEY PROMEDIO (G) | DES. L.P. | DES. TON |
|---------------------|-------------------|----------|---------------------|-----------|-----------|
| 0.01 | 354607.10 | 35077500 | 10.11 | 0.073355 | 254529.60 |
| 2.00 | 350727.90 | 30305000 | 11.57 | 0.074133 | 194119.70 |
| 4.00 | 340945.70 | 27185000 | 12.54 | 0.076019 | 164777.10 |
| 6.00 | 327585.60 | 24545000 | 13.35 | 0.078598 | 144548.80 |
| 8.00 | 299659.00 | 20542500 | 14.59 | 0.084178 | 118543.20 |
| 10.00 | 261088.40 | 16250000 | 16.07 | 0.093206 | 94267.46 |
| 12.00 | 219036.10 | 12395000 | 17.67 | 0.105791 | 74204.21 |
| 14.00 | 179226.70 | 9322500 | 19.23 | 0.121262 | 58801.39 |
| 16.00 | 145907.70 | 7095000 | 20.56 | 0.138462 | 47770.18 |
| 18.00 | 109029.20 | 4925000 | 22.14 | 0.166126 | 36958.02 |
| 20.00 | 76654.52 | 3212500 | 23.86 | 0.207517 | 27938.50 |
| 22.00 | 51890.71 | 2027500 | 25.59 | 0.263123 | 20844.44 |
| 24.00 | 32558.22 | 1185000 | 27.48 | 0.351681 | 15167.88 |
| 26.00 | 17565.23 | 585000 | 30.03 | 0.525024 | 10229.09 |
| 28.00 | 10695.10 | 327500 | 32.66 | 0.721249 | 7233.08 |
| 30.00 | 6997.34 | 200000 | 34.99 | 0.945599 | 5405.48 |
| 32.00 | 4599.17 | 122500 | 37.54 | 1.242495 | 4054.03 |
| 34.00 | 3438.03 | 87500 | 39.29 | 1.507918 | 3358.03 |
| 36.00 | 2730.59 | 67500 | 40.45 | 1.753475 | 2925.84 |
| 38.00 | 2356.80 | 57500 | 40.99 | 1.898041 | 2662.68 |
| 40.00 | 1573.37 | 37500 | 41.96 | 2.346562 | 2097.31 |

**TABLA 12. TABLA DE TONELAJE PARA CADA UNO DE LOS BANCOS EVALUADOS
EMPLEANDO UNA LEY DE CORTE DE 0.5 G DE ORO**

| BANCO | TONELAJE | LEY PROMEDIO (1) | VALOR MONETARIO (2) |
|-------|----------|------------------|---------------------|
| 2105 | 62500 | 0.897 | 7.82 |
| 2095 | 117500 | 0.818 | 7.13 |
| 2085 | 187500 | 0.780 | 6.79 |
| 2075 | 257500 | 0.800 | 6.97 |
| 2065 | 362500 | 0.782 | 6.81 |
| 2055 | 465000 | 0.723 | 6.30 |
| 2045 | 575000 | 0.711 | 6.19 |
| 2035 | 662500 | 0.697 | 6.07 |
| 2025 | 617500 | 0.660 | 5.75 |
| 2015 | 545000 | 0.617 | 5.38 |
| 2005 | 477500 | 0.575 | 5.00 |
| 1995 | 462500 | 0.548 | 4.77 |
| 1985 | 562500 | 0.587 | 5.11 |
| 1975 | 862500 | 0.587 | 5.11 |
| 1965 | 792500 | 0.567 | 4.94 |
| 1955 | 597500 | 0.548 | 4.77 |
| 1945 | 35000 | 0.546 | 4.76 |
| 1935 | 7500 | 0.539 | 4.70 |
| 1925 | 10000 | 0.511 | 4.45 |
| 1915 | 17500 | 0.515 | 4.49 |
| 1905 | 27500 | 0.512 | 4.46 |
| 1895 | 7500 | 0.529 | 4.61 |
| 1885 | 22500 | 0.524 | 4.56 |
| 1875 | 20000 | 0.524 | 4.56 |
| 1865 | 12500 | 0.517 | 4.50 |
| 1855 | 0 | 0.000 | 0.00 |
| 1845 | 0 | 0.000 | 0.00 |

(1) En g/ton

(2) En U.S. Dlls/ton

**TABLA 13. TABLA DE TONELAJE PARA CADA UNO DE LOS BANCOS EVALUADOS
EMPLEANDO UNA LEY DE CORTE DE 16 G DE PLATA**

| BANCO | TONELAJE | LEY PROMEDIO (1) | VALOR MONETARIO (2) |
|-------|----------|------------------|---------------------|
| 2105 | 17500 | 19.76 | 1.34 |
| 2095 | 110000 | 19.06 | 1.29 |
| 2085 | 137500 | 19.90 | 1.35 |
| 2075 | 165000 | 20.36 | 1.38 |
| 2065 | 220000 | 21.71 | 1.47 |
| 2055 | 282500 | 24.31 | 1.65 |
| 2045 | 510000 | 21.12 | 1.43 |
| 2035 | 575000 | 21.09 | 1.43 |
| 2025 | 577500 | 20.85 | 1.41 |
| 2015 | 557500 | 20.40 | 1.38 |
| 2005 | 467500 | 20.64 | 1.40 |
| 1995 | 560000 | 20.52 | 1.39 |
| 1985 | 697500 | 20.98 | 1.42 |
| 1975 | 837500 | 20.42 | 1.38 |
| 1965 | 727500 | 19.63 | 1.33 |
| 1955 | 585000 | 18.70 | 1.27 |
| 1945 | 10000 | 19.58 | 1.33 |
| 1935 | 2500 | 19.62 | 1.33 |
| 1925 | 17500 | 21.17 | 1.43 |
| 1915 | 20000 | 22.51 | 1.52 |
| 1905 | 7500 | 17.96 | 1.22 |
| 1895 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1885 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 1875 | 7500 | 16.33 | 1.11 |
| 1865 | 2500 | 16.46 | 1.11 |
| 1855 | 0 | 0.000 | 0.00 |
| 1845 | 0 | 0.000 | 0.00 |

(1) En g/ton

(2) En U.S. Dlls/ton

V.4 DISTRIBUCION GEOGRAFICA.

V.4.1 VALORES UNITARIOS.

Los valores unitarios son valores económicos de mineral (Au, Ag, etc.), por unidad de ley (g, %) que sirven para obtener el valor monetario de cada unidad minable a partir de sus contenidos minerales.

Empleando los valores unitarios se hace posible tener bajo un mismo patrón de comparación (valor monetario) leyes de diferentes metales (Au, Ag, Pb, etc.).

Estos valores unitarios se obtienen aplicando al valor bruto del mineral (aquel que resulta de multiplicar la cotización base del mineral por su ley media) las deducciones por fundición, fletes, recuperación metalúrgica, derechos de minería y misceláneos.

De manera que para calcular el valor monetario del mineral en cada tonelada basta con efectuar el producto del valor unitario del mineral por la ley media del mismo.

El objetivo de transformar las leyes a dólares es el manejar cifras monetarias que permitan agilizar las etapas posteriores a la evaluación de reservas, tales como son la del diseño del tajo y otras que responden a otras consideraciones económicas.

V.4.2 DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LOS VALORES DE ORO Y PLATA.

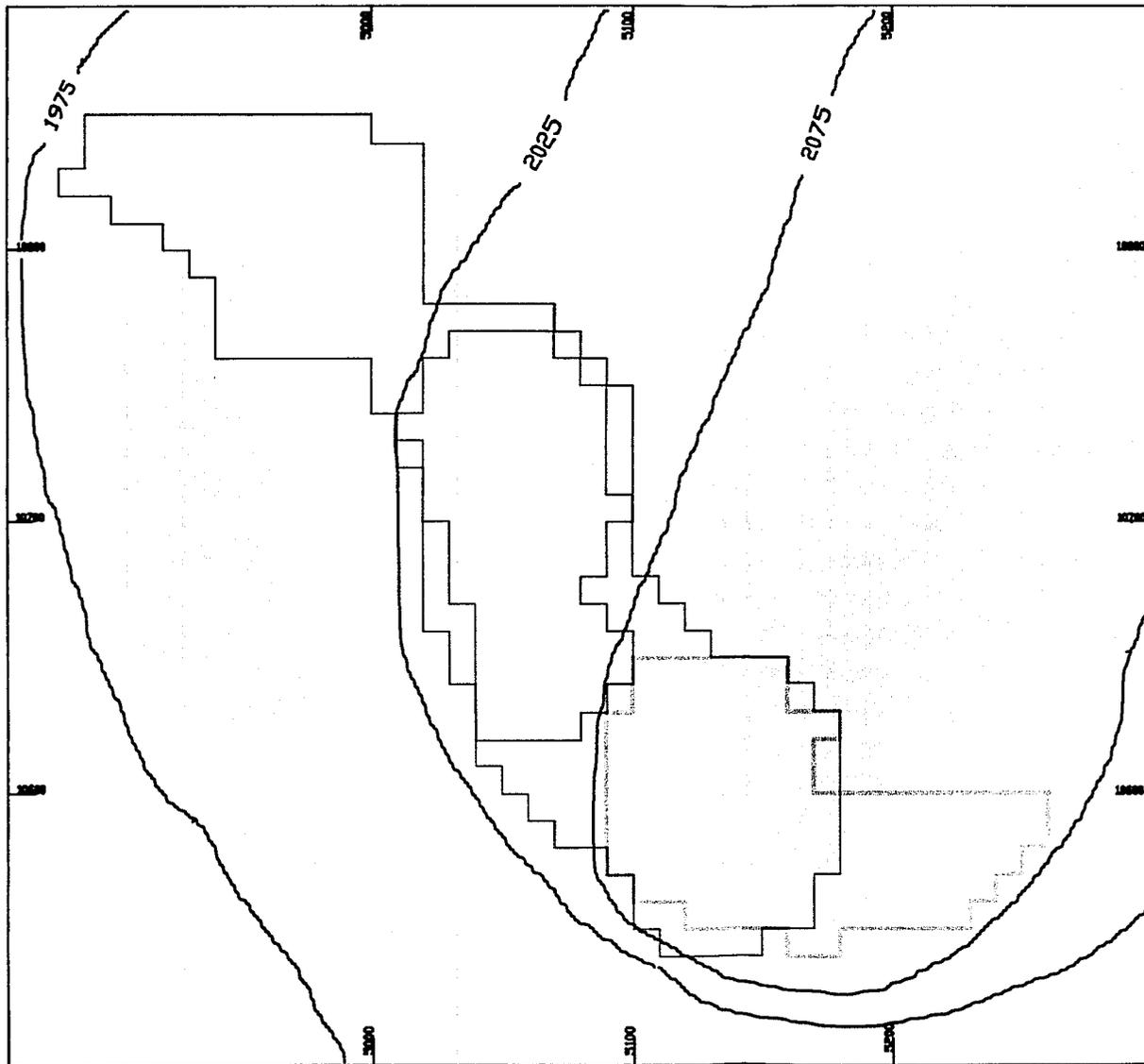
Una vez efectuada la evaluación de reservas se procedió a obtener la distribución geográfica de las leyes combinadas de oro y plata convertidas a valores monetarios, expresados en U.S. dólares, mediante la utilización de los valores unitarios respectivos.

Es decir, la ley de oro de cada bloque se multiplicó por el valor unitario del metal en dólares y a este producto se le agregó el resultado de multiplicar la ley de plata de cada bloque por su valor unitario en dólares, obteniendo así para cada uno de los bloques el valor en dólares por cada tonelada.

Los valores unitarios que se manejaron para oro y plata fueron de 8.71268 U.S. Dlls/g y 0.06773 U.S. Dlls/g, respectivamente. Estos valores unitarios fueron proporcionados por la Compañía.

En la figura 10 se muestra para las bancos 2075, 2025 y 1975 la configuración y distribución geográfica de las zonas de más alta ley.

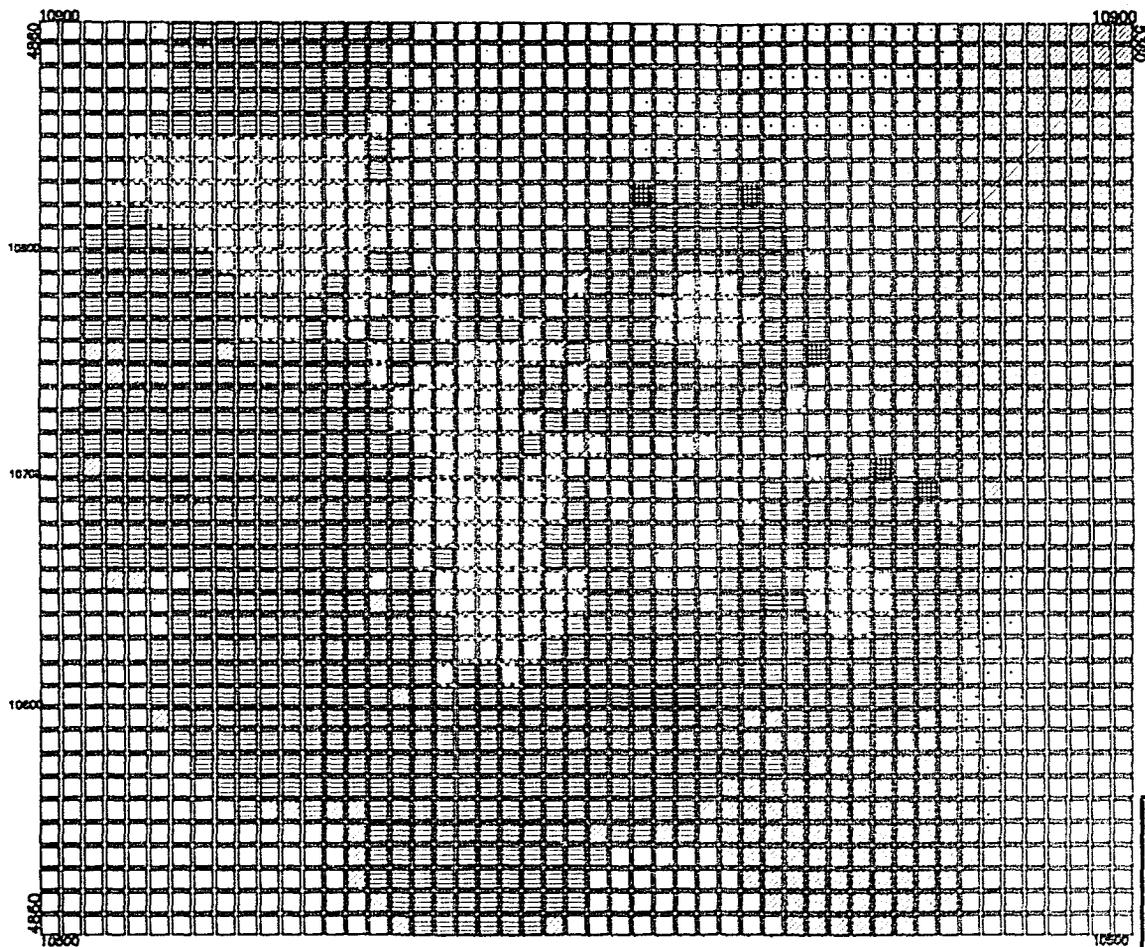
En la figura 11 se presenta para el banco 1975 la distribución geográfica de los valores combinados de oro y plata, expresados en U.S. dólares.



EXPLICACION

- NIVEL 2075
- NIVEL 2025
- NIVEL 1975
- CURVA DE NIVEL

| | | |
|------------------------|---|--|
| UNAM | FACULTAD DE INGENIERIA | |
| | INGENIERO GEOLOGO | |
| | TESIS PROFESIONAL | |
| | TENDENCIA DE LA MINERALIZACION ECONOMICA DE ORO Y PLATA | |
| RICARDO GARCIA COLLADO | | |
| MAYO 88 | FIGURA 10 | |



EXPLICACION

- NO EVALUADO
- MENOR DE 3 DLLS.
- DE 3 A 8 DLLS.
- DE 6 A 8 DLLS.
- MAYOR DE 8 DLLS.

BANCO 1975

U
N
A
M

FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERO GEOLOGO
TESIS PROFESIONAL

DISTRIBUCION GEOGRAFICA
DE LOS VALORES
DE ORO Y PLATA

RICARDO GARCIA COLLADO

PLATO 08

FIGURA 11

V.5 ESTRATEGIAS DE EXPLORACION.

V.5.1 INTRODUCCION.

Uno de los mayores retos en la etapa de exploración es establecer un programa óptimo de barrenación, pudiendo considerarse en este caso el aspecto óptimo respecto de la relación costo-beneficio.

El objetivo sería establecer un programa de barrenación que permitiera obtener la mayor cantidad de información posible a un costo razonable.

El establecimiento de un programa de barrenación normalmente involucra la consideración de los siguientes elementos: la variabilidad de la mineralización, la morfología del depósito, la predicción de los errores de estimación y los costos de exploración.

Al analizar la información obtenida sobre la variabilidad de la ley junto con la información geológica, permite confirmar hipótesis geológicas del depósito y desarrollar guías de exploración. La morfología misma del depósito es una guía de exploración.

Los errores de estimación cuantifican la calidad de la estimación ofrecida por un programa de barrenación y permiten hacer una categorización de las reservas.

El dato de costos incluye los recursos requeridos para la barrenación y los costos asociados con las diferentes opciones de exploración.

Alternativas de estrategias de exploración pueden ser investigadas con la Geostatística, empleando el concepto de la varianza de estimación.

Esta estrategia alternativa utiliza el semivariograma ajustado a la variabilidad natural del depósito, obteniendo el cálculo de la varianza de estimación asociada a la estimación de un volumen.

El krigage es un método geoestadístico en el que, al depender los pesos de influencia de las posiciones relativas de las muestras y no de los valores particulares que estas pueden tener, puede calcular todos los esquemas de muestreo que se desean para tratar de determinar aquel que optimice la información sin necesidad de efectuar físicamente ningún muestreo, pudiendo así definirse si se requiere una barrenación adicional, la localización más adecuada de los barrenos y el número óptimo de ellos según la precisión requerida en las estimaciones (Obregón, s/f), (Tulcanaza, 1984).

V.5.2 DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE EXPLORACION.

Los objetivos que se plantearon fueron los de diseñar estrategias alternativas de exploración, utilizando como criterio de apoyo a la varianza de estimación, a fin de establecer un programa de barrenación que optimice la información tanto para el área ya explorada como para una área nueva en exploración y definir la posición y número de barrenos adicionales (en caso de que fuesen necesarios) para cada una de dichas áreas.

La estrategia para el área ya explorada consistió en proponer barrenos adicionales, de tal manera que cubran los huecos sin información dejados por el muestreo ya practicado, de modo que las zonas que actualmente no pudieron ser evaluadas, lo sean con la información adicional proporcionada por los barrenos propuestos.

En el siguiente punto se presentará el análisis hecho para el área a explorar, ya que la estrategia para el área ya explorada estará basada en los resultados obtenidos para la primera área, en la cual se puede tener una completa libertad para el manejo de las ubicaciones de los barrenos.

I. ESTRATEGIA PARA UNA AREA NUEVA DEL DEPOSITO.

Para el diseño de la estrategia de exploración óptima en una área nueva del depósito, se consideró una área hipotética de 500 m x 500 m, la cual comprendería 2500 bloques de 10 m x 10 m x 10 m. Se designó como una área hipotética por el hecho de poder estar ubicada en cualquier dirección posible en las extensiones del cuerpo intrusivo; las dimensiones de esta área nueva son semejantes a las del área explorada. En la figura 9 se muestran las áreas potenciales para exploración.

Para esta área hipotética se diseñaron dos configuraciones o retículas de barrenación: una con una disposición cuadrangular y otra con una triangular, haciendo variar en ambos casos las distancias entre barrenos a 120 m, 100 m, 80 m y 60 m.

Para el diseño de las estrategias de exploración se tomó en consideración el rango de influencia de las muestras para la variable ORO PROMEDIO, rango que de acuerdo al modelo de semivariograma ajustado, resultó ser de 60 m.

Lo que se pretende al seleccionar estas distancias para las retículas cuadrangular y triangular es lo siguiente:

Por un lado, al seleccionar una separación mínima de 60 m entre barrenos, se ubicaría un barreno en donde terminara la influencia de las muestras de uno contiguo. De esta manera el área sería evaluada en su totalidad.

Por otro lado, con una separación entre barrenos de 120 m lo que se pretendería hacer sería que donde terminara la influencia de las muestras de un barreno, iniciara la zona influencia de las muestras de un barreno contiguo. Con una configuración de este tipo quedarían áreas mínimas que no podrían ser evaluadas por

falta de información.

Con las separaciones a 80 m y 100 m (casos intermedios) se pretende completar el análisis de la variación del número de barrenos requeridos para evaluar el área y saber cómo variaría el error asociado a la estimación con cada configuración.

Con una estrategia de barrenación a cada 60 m el área a evaluar quedaría completamente cubierta, sin embargo el número de barrenos a requerir sería excesivamente grande, 49 para la configuración cuadrangular y 47 para la triangular, haciendo probablemente incosteable la exploración. Por tanto, este arreglo (para ambas configuraciones) fue eliminado para cualquier análisis posterior, realizándose el análisis sólo para los arreglos a 120 m, 100 m y 80 m.

El área hipotética fue evaluada empleando la técnica del krigage, tomando información disponible para la variable ORO PROMEDIO; los parámetros estadísticos y estructurales utilizados fueron los que se obtuvieron para dicha variable.

La varianza de estimación global obtenida (error asociado a la estimación) y el número de barrenos requeridos en cada configuración, se emplearon como los criterios principales para la selección de la mejor estrategia de exploración, en donde el error asociado a la estimación representa al factor beneficio y el número de barrenos representa al factor costo.

En la tabla 14 se describe para cada uno de los arreglos diseñados con configuración cuadrangular el número de barrenos a requerir, el número de bloques evaluados del total de 2500 bloques posibles a evaluar y el error relativo asociado.

En las tabla 15 se describe la información correspondiente para los arreglos con configuración triangular.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS.

Si la barrenación se efectuara a cada 120 m con una configuración cuadrangular, el área a evaluar sería cubierta con 16 barrenos, evaluándose 1792 bloques de un total de 2500, con un error de estimación global (desviación estándar) de 0.822608E-02.

Si la barrenación se efectuara a cada 100 m se requerirían 25 barrenos y se evaluarían 2400 bloques, obteniéndose un error de estimación global (desviación estándar) de 0.680593E-02.

Esto significa que empleando el arreglo de barrenación a cada 100 m, se requerirían 9 barrenos extras respecto del arreglo a 120 m, lo que equivaldría a incrementar los gastos de exploración en un 56.25%, para reducir el error de estimación global en un 17.26% (0.142015E-02) (Tabla 16).

Comparando los resultados obtenidos para los arreglos a 100 m y 80 m se obtiene que efectuando la barrenación a cada 80 m el número de barrenos requeridos sería de 36 (incrementando los gastos de exploración en un 44%), se evaluarían 96 bloques más

TABLA 14. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION CUADRANGULAR DE BARRENOS.

| DISTANCIA (m) | NUMERO DE BARRENOS | BLOQUES EVALUADOS | DESV. LEY PROMEDIO |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 120 | 16 | 1792 | 0.822608E-02 |
| 100 | 25 | 2400 | 0.680593E-02 |
| 80 | 36 | 2496 | 0.581563E-02 |

TABLA 15. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION TRIANGULAR DE BARRENOS.

| DISTANCIA (m) | NUMERO DE BARRENOS | BLOQUES EVALUADOS | DESV. LEY PROMEDIO |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 120 | 14 | 1568 | 0.895990E-02 |
| 100 | 23 | 2304 | 0.709055E-02 |
| 80 | 33 | 2360 | 0.599289E-02 |

TABLA 16. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION CUADRANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS: 120 VS 100 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 120 | 16 | 0.822608E-02 | 1792 |
| 100 | 25 | 0.680593E-02 | 2400 |
| DIFERENCIA | 9 | 0.142015E-02 | 608 |
| DIF. (%) | 56.25% | 17.26% | 33.93% |

TABLA 17. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION CUADRANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS 100 VS 80 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 100 | 25 | 0.680593E-02 | 2400 |
| 80 | 36 | 0.581563E-02 | 2496 |
| DIFERENCIA | 11 | 0.099030E-02 | 96 |
| DIF. (%) | 44% | 14.55% | 4% |

TABLA 18. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION CUADRANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS: 120 VS 80 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 120 | 16 | 0.822608E-02 | 1792 |
| 80 | 36 | 0.581563E-02 | 2496 |
| DIFERENCIA | 20 | 0.241045E-02 | 704 |
| DIF. (%) | 125% | 29.30% | 39.29% |

que con la estrategia a 100 m y el error de estimación global se reduciría en sólo un 14.55% (Tabla 17).

Comparando las estrategias extremas (120 m vs 80 m), el error se reduce en un 29.30% incrementando los costos en un 125% (Tabla 18).

En las tablas 19, 20 y 21 se presentan las comparaciones hechas para los arreglos de la configuración triangular.

En estas tablas se aprecia que las relaciones costo-beneficio entre los diferentes arreglos se mantienen consistentes a las de sus homólogas de la configuración cuadrangular.

En general, se observa que tanto para la configuración cuadrangular como para la triangular a medida que aumenta el número de barrenos requeridos, no es proporcional la reducción del error de estimación.

De manera que si se trazara una curva graficando el número de barrenos (eje x) contra el error de estimación global (eje y), está curva sería asintótica al eje x. Es decir, que a pesar de que se incrementara considerablemente el número de barrenos, lo que significaría un incremento directamente proporcional en los costos de exploración, la reducción correspondiente en el error de estimación global no sería ni proporcional ni significativa.

Es decir, desde el momento en que se pretendiera reducir la distancia de separación entre barrenos de 120 m a 100 m, los costos de exploración se dispararían en gran medida; sin embargo, la disminución que se lograría en el error de estimación no justificaría el incremento de costos de una barrenación con separaciones entre barrenos a 100 m y mucho menos de una a 80 m.

Por lo anterior, se considera que resultarían mejores las configuraciones cuadrangular o triangular a 120 m. Con estos arreglos, se podría optimar la información a una relación costo-beneficio aceptable.

En las tablas 22, 23 y 24 se presentan las comparaciones hechas de los arreglos con configuración cuadrangular contra sus homólogas de la configuración triangular.

En la tabla 22 se observa que para evaluar el área utilizando la configuración triangular a 120 m, se requerirían dos barrenos menos (14) que con la configuración cuadrangular a la misma distancia, para la cual se requerirían 16 barrenos. Asimismo, para la primera configuración el error de estimación global sería mayor en un 8.19%. Sin embargo, se considera que la reducción del error en esas proporciones no justificaría el gasto que representarían esos dos barrenos.

Para las estrategias a 100 m y 80 m seguiría siendo superior la configuración triangular sobre la cuadrangular.

Es por que lo que se considera como una mejor configuración la triangular respecto de la cuadrangular.

TABLA 19. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION TRIANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS: 120 VS 100 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 120 | 14 | 0.895990E-02 | 1568 |
| 100 | 23 | 0.709055E-02 | 2304 |
| DIFERENCIA | 9 | 0.186935E-02 | 736 |
| DIF. (%) | 64.25% | 20.86% | 46.94% |

TABLA 20. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION TRIANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS: 100 VS 80 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 100 | 23 | 0.709055E-02 | 2304 |
| 80 | 33 | 0.599289E-02 | 2360 |
| DIFERENCIA | 10 | 0.109766E-02 | 56 |
| DIF. (%) | 43.44% | 15.48% | 2.43% |

TABLA 21. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION PARA UNA DISTRIBUCION TRIANGULAR DE BARRENOS.

DISTANCIAS: 120 VS 80 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 120 | 14 | 0.895990E-02 | 1568 |
| 80 | 33 | 0.599284E-02 | 2360 |
| DIFERENCIA | 19 | 0.296706E-02 | 792 |
| DIF. (%) | 135.71% | 33.11% | 50.51% |

TABLA 22. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION COMPARANDO DISTRIBUCIONES DE BARRENOS EN ARREGLOS CUADRANGULAR VS TRIANGULAR.

DISTANCIA: 120 VS 120 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| CUADRANGULAR | 16 | 0.822608E-02 | 1792 |
| TRIANGULAR | 14 | 0.895990E-02 | 1568 |
| DIFERENCIA | 2 | 0.073382E-02 | 224 |
| DIF. (%) | 12.5% | 8.19% | 12.5% |

TABLA 23. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION COMPARANDO DISTRIBUCIONES DE BARRENOS EN ARREGLOS CUADRANGULAR VS TRIANGULAR.

DISTANCIA: 100 VS 100 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| CUADRANGULAR | 25 | 0.680593E-02 | 2400 |
| TRIANGULAR | 23 | 0.709055E-02 | 2304 |
| DIFERENCIA | 2 | 0.028462E-02 | 96 |
| DIF. (%) | 8% | 4.01% | 4% |

TABLA 24. ESTRATEGIAS DE EXPLORACION COMPARANDO DISTRIBUCIONES DE BARRENOS EN ARREGLOS CUADRANGULAR VS TRIANGULAR.

DISTANCIA: 80 VS 80 m

| | NUMERO DE BARRENOS | DESV. LEY PROMEDIO | BLOQUES EVALUADOS |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| CUADRANGULAR | 36 | 0.581563E-02 | 2496 |
| TRIANGULAR | 33 | 0.599289E-02 | 2360 |
| DIFERENCIA | 3 | 0.017726E-02 | 136 |
| DIF. (%) | 8.33% | 2.95% | 5.45% |

II. ESTRATEGIA PARA EL AREA EXPLORADA.

Dada la distribución espacial de los barrenos en esta área y apoyándose en los resultados obtenidos en el inciso anterior, de que con una barrenación a cada 120 m se lograría optimar la información a un costo razonable, se proponen los siguientes cuatro barrenos adicionales que cubrirán las zonas dentro del área que no pudieron ser evaluadas debido a la falta de información, con lo que además se mejorará la varianza de estimación global del área.

Las posiciones de estos barrenos serían las siguientes:

| BARRENO | COORDENADAS | |
|---------|-------------|----------|
| | ESTE | NORTE |
| BSP-A | 5048.00 | 10826.00 |
| BSP-B | 5122.00 | 10851.00 |
| BSP-C | 5220.00 | 10848.00 |
| BSP-D | 5138.00 | 10691.00 |

VI . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

1. La mineralización diseminada de Au-Ag en las unidades calcáreas resulta poco atractiva tanto en tonelaje como en ley.
2. El cuerpo intrusivo resulta ser la unidad con mineralización diseminada y en vetillas de Au-Ag de mayor interés económico.
3. Cada una de las variables estudiadas, ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE tiene una distribución estadística lognormal.
4. Las variables ORO 1, ORO 2 y ORO PROMEDIO presentan un comportamiento estadístico y estructural semejante, por lo que el cálculo de reservas minerales podría realizarse con cualquiera de las tres variables, llegando prácticamente a los mismos resultados.
5. La ley promedio (media geométrica) para cada una de las variables estudiadas es la siguiente:

| VARIABLE | LEY PROMEDIO (g/ton) |
|--------------|----------------------|
| ORO 1 | 0.3044 |
| ORO 2 | 0.3017 |
| ORO PROMEDIO | 0.3062 |
| PLATA | 8.953 |
| PLOMO | 971.65 |
| ZINC | 2470.55 |
| COBRE | 51.46 |

6. En la mineralización las leyes de ORO y PLATA resultan económicamente las únicas atractivas; las variables PLOMO, ZINC y COBRE presentan valores de poco o ningún interés económico.
7. La variabilidad espacial de las variables ORO 1, ORO 2, ORO PROMEDIO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE está caracterizada por un modelo geoestadístico del tipo esférico.
8. El rango de influencia de las muestras para cada una de las variables es la siguiente:

| VARIABLE | RANGO DE INFLUENCIA (m) |
|--------------|-------------------------|
| ORO 1 | 65 |
| ORO 2 | 65 |
| ORO PROMEDIO | 60 |
| PLATA | 52 |
| PLOMO | 61 |
| ZINC | 75 |
| COBRE | 45 |

9. Las técnicas de la Geoestadística son aplicables al cálculo de reservas minerales del Proyecto Minero "Cerro de San Pedro".
10. El krigage lognormal resultó ser el mejor estimador de la propiedad "ley" del depósito.
11. En el estudio efectuado se evaluaron 27 bancos, obteniendo -en forma global para una ley mínima económica de ORO de 0.5 g/ton- un total de 7,767,500 toneladas con una ley promedio de oro de 0.63904 g/ton y un error relativo asociado de 0.00442990.
12. Evaluando la misma cantidad de bancos para la PLATA, se obtuvo para una ley mínima económica de 16 g/ton un total de 7,095,000 toneladas con una ley promedio de 20.56 g/ton y un error relativo asociado de 0.13846190.
13. Con la información disponible fue posible diseñar tanto para el área ya explorada como para una área nueva del depósito una estrategia de exploración que permita optimar la información.
14. Para el área ya explorada se requieren cuatro barrenos adicionales para poder estimar zonas que no pudieron ser evaluadas por falta de información.
15. Para explorar una área nueva del depósito resultaría superior (respecto de la relación costo-beneficio) una estrategia con configuración triangular a una con configuración cuadrangular.
16. Para realizar el cálculo de reservas minerales de un depósito es suficiente con una computadora PC que posea ciertos aditamentos que aceleren la velocidad de procesamiento de la información (como la empleada para efectuar la evaluación que ocupa este trabajo), siendo no necesarios equipos de cómputo de muy altas especificaciones.

RECOMENDACIONES.

1. Por lo concluido en (4) se recomienda no analizar en lo subsecuente, dos veces por oro cada muestra.
2. Debido a las leyes poco atractivas de las variables PLOMO, ZINC y COBRE se recomienda no analizar cada muestra para cada una de estas variables, en su defecto se recomienda realizar compósitos.
3. Para aquellas muestras que provengan del contacto caliza-intrusivo se recomienda analizar cada una de ellas para las variables ORO, PLATA, PLOMO, ZINC y COBRE, con las cuales se podrá evaluar la mineralización de brecha.

4. Para el área ya explorada se recomiendan cuatro barrenos con los cuales se podrá estimar zonas que no pudieron ser evaluadas por falta de información y mejorar la varianza de estimación global, la posición de estos barrenos es la siguiente:

| BARRENO | COORDENADAS | |
|---------|-------------|----------|
| | ESTE | NORTE |
| BSP-A | 5048.00 | 10826.00 |
| BSP-B | 5122.00 | 10851.00 |
| BSP-C | 5220.00 | 10848.00 |
| BSP-D | 5138.00 | 10691.00 |

5. Las estrategias de exploración con configuración cuadrangular y triangular con barrenación a cada 120 m optimarían la información a una relación costo-beneficio aceptable, en comparación con los arreglos con distanciamientos menores entre barrenos con los cuales los costos de exploración se elevarían excesivamente.
6. Para una área nueva del depósito se recomienda una estrategia de exploración de configuración triangular con barrenación a cada 120 m.

BIBLIOGRAFIA

- Aitchison, J., and Brown, J., 1957, The lognormal distribution, with special reference to its uses in economics. London, Cambridge University Press. 176 p.
- Balbontín M., Baltazar H., 1972, Geología del Distrito Minero de Cerro de San Pedro, S.L.P. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería. Universidad Autónoma de S.L.P. 27 p.
- Berlanga Gutiérrez, J.M., y Obregón Andría, J.J., 1981, Apuntes de Geostatística. Facultad de Ingeniería, UNAM. 180 p.
- Brooker, P.I., 1979, Kriging: Engineering and Mining Journal, vol.180, No.9, p.148-153.
- Bros, Camilo, 1878, Ligeros apuntes sobre el mineral de San Pedro, Estado de San Luis Potosí. Archivo del C.R.M.
- Carrillo Bravo, José, 1971, La Plataforma Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, vol.23, Núms.1-6.
- _____, 1982, Exploración petrolera de la Cuenca Mesozoica del Centro de México: Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., vol.XXXIV, No.1, p.21-46.
- Chaouai, Nour-Eddine, and Fytas, Kostas, 1991, A sensitivity analysis of search distance and number of samples in indicator kriging: Canadian Industrial Mineral Bulletin, vol.84, No.948, p.37-43.
- Clark, Isobel, 1979, The semivariogram-Part I: Engineering and Mining Journal, vol.180, No.7, p.90-94.
- _____, 1979, The semivariogram-Part 2: Engineering and Mining Journal, vol.180, No.8, p.92-97.
- Claude, J., and Robida, F., 1984, Computation of the variance of global estimation. 18th International Symposium. Application of computers and mathematics in the mineral industry. London, p.457-466.
- Coney, P.J., 1983, Un modelo tectónico de México y sus relaciones con América del Norte, América del Sur y el Caribe: Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, vol.XV, No.1, p.6-15.
- Cruz Peralta, M., 1976, Estudio geológico-geoquímico de la Sierra de San Pedro, S.L.P. Archivo del C.R.M.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M and Clark, K.F., 1981, Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis: Revista del Instituto de Geología, UNAM, vol.5, No.2, p.223-238.

- Deverly, Fabrice, 1984, Geostatistical approach to mining sampling. 18th International Symposium. Application of computers and mathematics in the mineral industry. London, p.379-388.
- Dowd, P.A., 1982, Lognormal kriging-The general case: Mathematical Geology, vol.14, No.5, p.475-499.
- Dunlop, John, 1977, Geostatistical modelling of an Australian iron ore body. 16th International Symposium. Application of computers in the mineral industry. Nueva York, p.226-239.
- Fernández, Roberto, 1922, La industria minera metalúrgica en el Estado de San Luis Potosí: Boletín Minero, No.14, p.482-506.
- Gómez del Campo, José María, 1878, Socavón Aventurero. Tipografía de Silverio M. Velez.
- _____, 1881, Noticia del mineral de San Pedro: El Minero Mexicano, p.27-31, 40-43.
- _____, 1883, El mineral de San Pedro: El Minero Mexicano, p.185-187, 201-203.
- Imlay, R.W., 1936, Geology of the Coahuila Peninsula, Mexico. Part IV. Geology of the Western part of the Sierra de Parras: Geol. Soc. Am. Bull., vol.47, p.1091-1152.
- Journel, A.G., 1979, Geostatistical simulation: Methods for exploration and mine planning: Engineering and Mining Journal, vol.180, No.12 p.86-91.
- Kim, Y.C., and Medhi, P.K., 1981, Devising an alternate development drilling strategy using geostatistics-A case study in porphyry copper deposit: Society of Mining Engineers of AIME, p.1-24.
- Labarthe H., Guillermo y Tristán G., Margarito, 1978, Cartografía geológica hoja "San Luis Potosí": Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto Técnico No.59, 41 p.
- Labarthe H., Guillermo, Tristán G., Margarito y Aranda G., Jorge, 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Edo. de San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto Técnico No.85, p.203.
- Laird, George A., 1905, The gold-mines of the San Pedro district, Cerro de San Pedro, State of San Luis Potosí, Mexico: Transactions of the American Institute of Mining Engineers, vol.XXXV, p.858-878.
- Longoria Martínez, J., y Victoria Morales, A., 1991, Geología y mineralización disseminada en el yacimiento Cerro de San Pedro, S.L.P: Memorias técnicas. XIX Convención Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. p.91-101.

- Morán Zenteno, D., 1984, Geología de la República Mexicana. INEGI y Facultad de Ingeniería, UNAM. 88 p.
- Murillo, Olayo E., 1991, Cálculo de la varianza de estimación global de reservas: Geomimet No.169, p.12-24.
- Noguez Alcántara, B., 1977, Informe geológico del Proyecto Cerro de San Pedro, S.L.P. Archivo Compañía Fresnillo. 29 p. (inédito).
- Obregón A., J.J., s/f, El krigage: Apuntes de la asignatura de Geostatística. 7 p.
- Olea, Ricardo A., 1984, Sampling design optimization for spatial functions: Mathematical Geology, vol.16, No.4, p.369-392.
- Pinto, Julio, 1976, Informe geológico del distrito minero de San Pedro, S.L.P. Archivo Compañía Fresnillo. 14 p. (inédito).
- Prescott, Basil en Alvarez, Alvaro, 1976, Mineral de Cerro de San Pedro, S.L.P. (inédito).
- Raisz, Erwin, 1959, Landforms of Mexico. Geography Branch of the Office of Naval Research. Cambridge, Mass.
- Rendu, J.M., 1979, Normal and lognormal estimation: Mathematical Geology, vol.11, No.4, p.407-422.
- , 1980, A case study: Kriging for ore evaluation and mine planning: Engineering and Mining Journal, vol.181, No.1, p.114-120.
- , 1984, Geostatistical modelling and geological controls. 18th International Symposium. Application of computers and mathematics in the mineral industry. London, p.467-476.
- Rendu, J.M., and Readdy, L., 1982, Geology and the semivariogram-A critical relationship. 17th International Symposium. Applications of computers and operations research in the mineral industry. Nueva York, p.771-783.
- Royle, A.G., 1979, Why geostatistics?: Engineering and Mining Journal, vol.180, No.5, p.92-101.
- Secretaría de Gobernación y Gobierno del Edo. de San Luis Potosí, 1988, Los Municipios de San Luis Potosí. 1a. Edición. Colección Enciclopedia de los Municipios de México. 280 p.
- Sociedad Geológica Mexicana, 1982, Libreto-guía de la excursión geológica a la Cuenca Mesozoica del Centro de México, Estados de San Luis Potosí y Zacatecas. VI Convención Geológica Nacional. 4 p.
- Taylor, Harold, 1982, Modelling an orebody having lognormal grade distribution. 17th International Symposium. Applications of

computers and operations research in the mineral industry.
Nueva York, p.784-788.

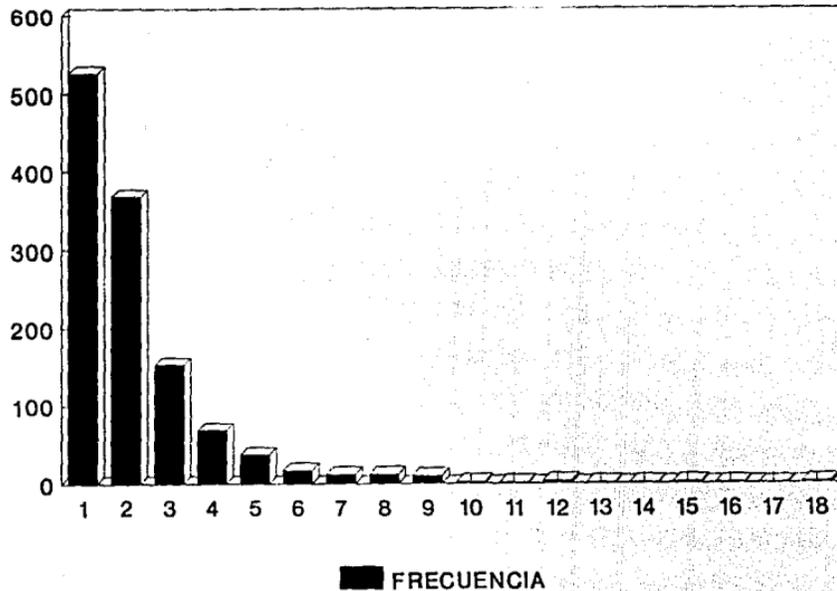
Tulcanasa, E., 1984, Analysis and assessment of grade variability for improving exploration planning and reserve estimation: Technical Papers, Mining Engineering, vol.36, No.4, p.355-361.

Victoria Morales, A., 1990, Investigación de la zonificación del oro en el yacimiento de Cerro de San Pedro, S.L.P. Gerencia de exploración zona norte. Depto. de petrografía. Compañía Fresnillo. 24 p. (inédito).

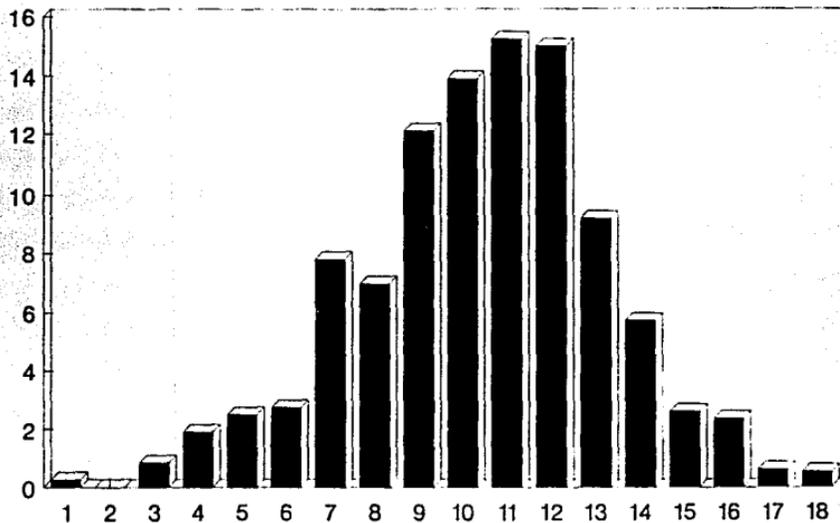
ANEXOS

ANEXO ESTADISTICO

HISTOGRAMA ORO 2

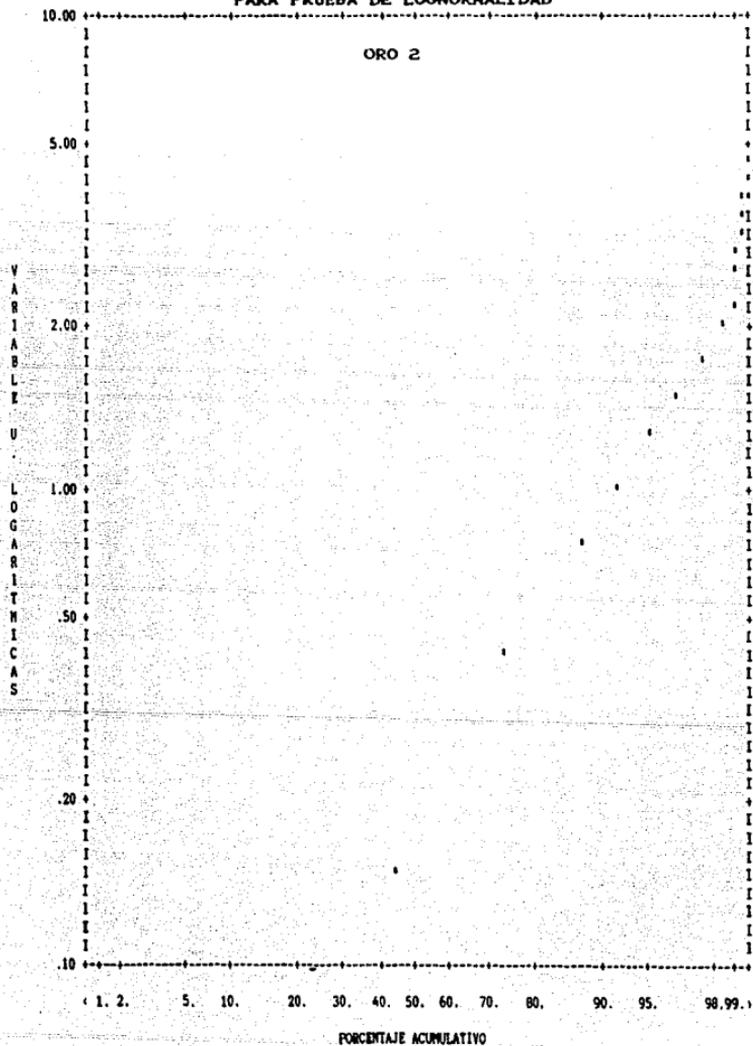


HISTOGRAMA LOG ORO 2

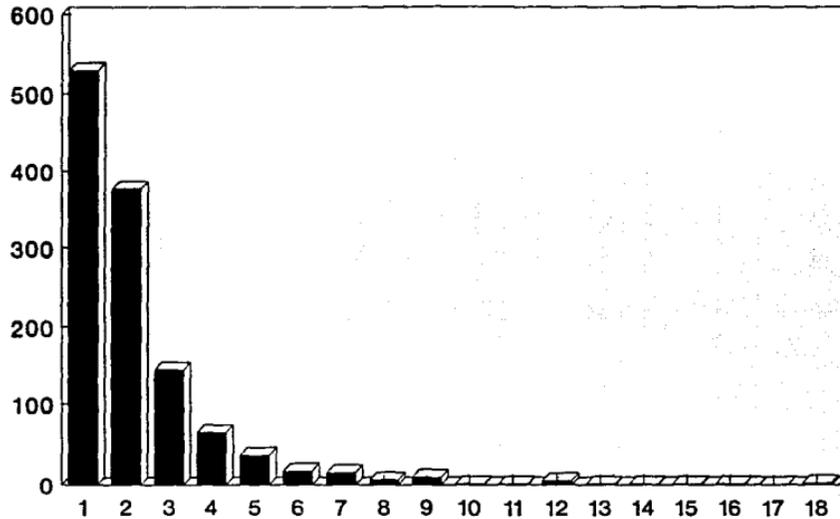


■ FRECUENCIA RELATIVA

FIGURA 14. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD



HISTOGRAMA ORO PROMEDIO



■ FRECUENCIA

HISTOGRAMA LOG ORO PROMEDIO

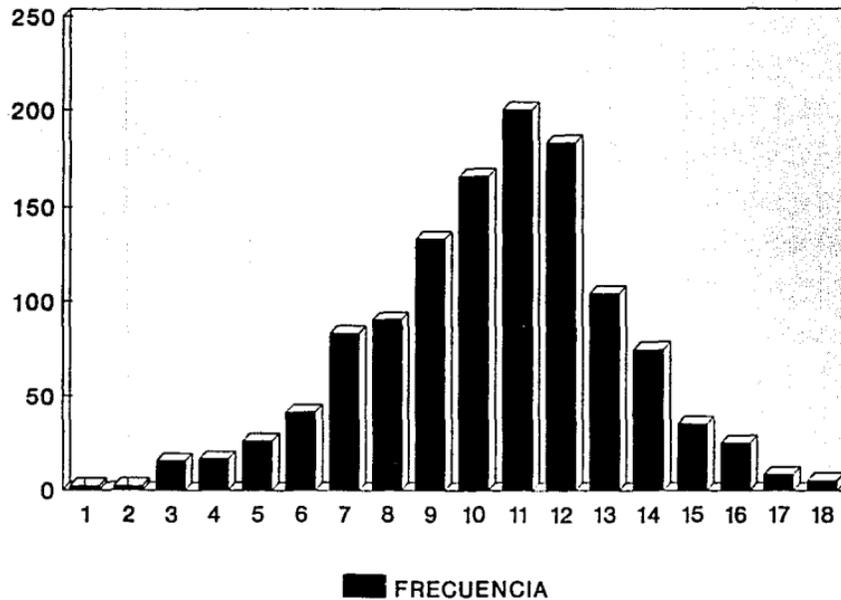
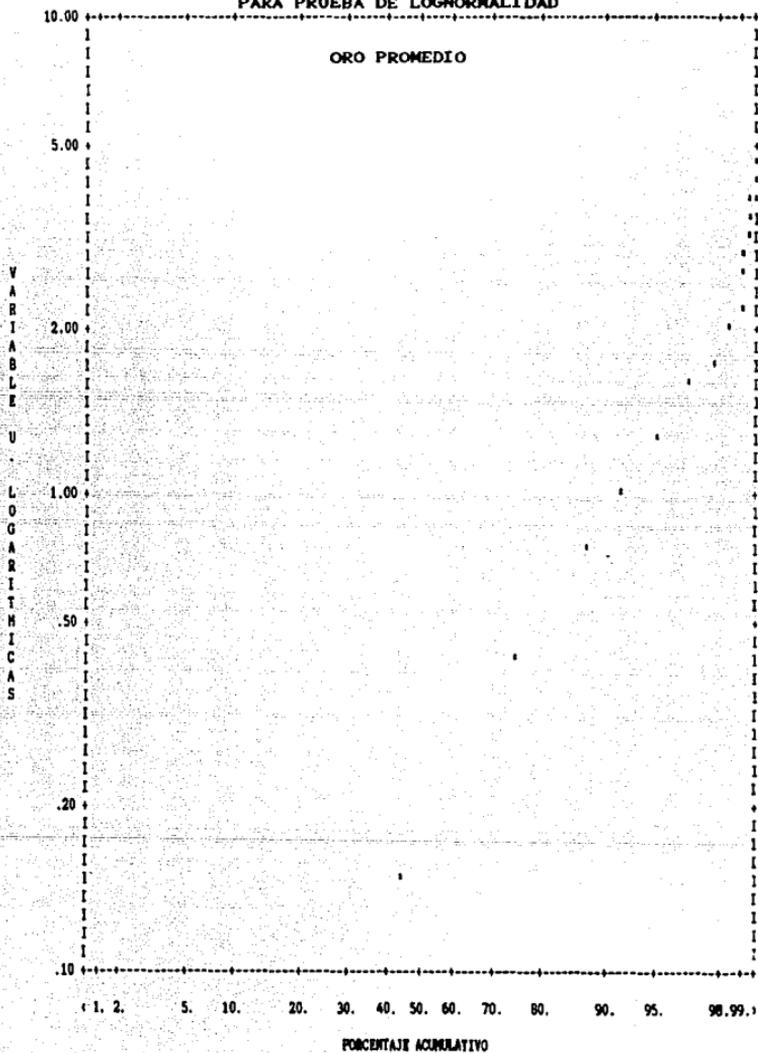
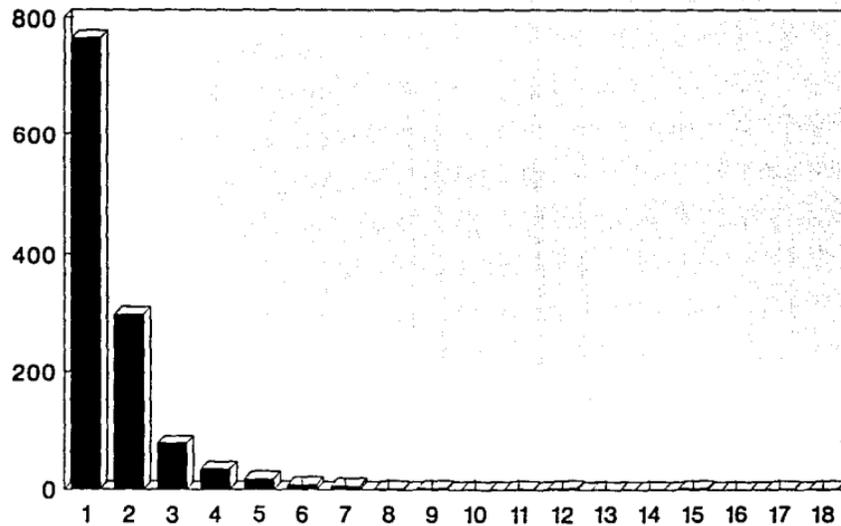


FIGURA 17. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD



HISTOGRAMA PLATA



■ FRECUENCIA

HISTOGRAMA LOG PLATA

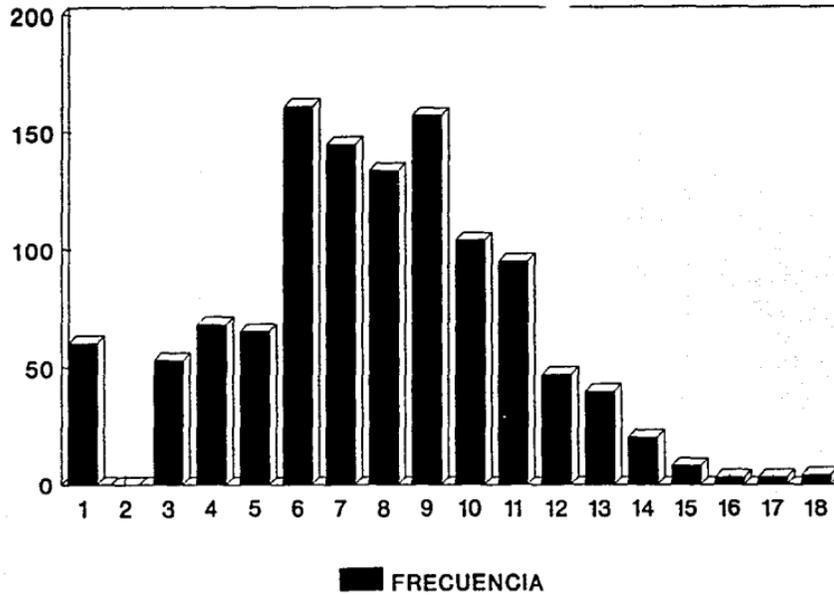
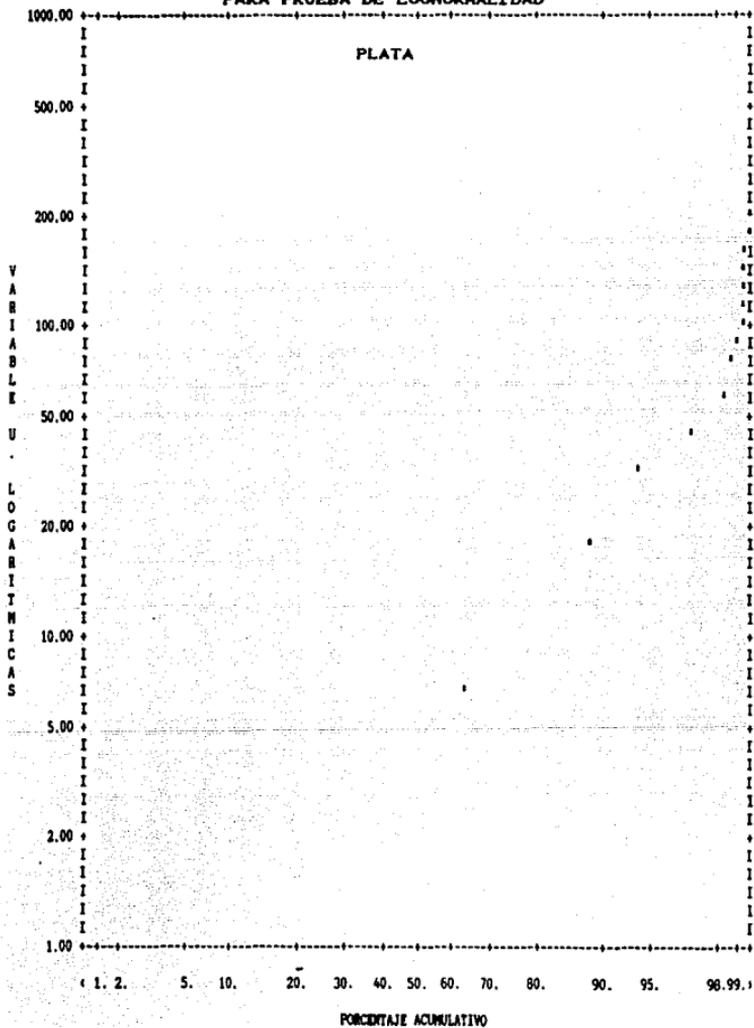
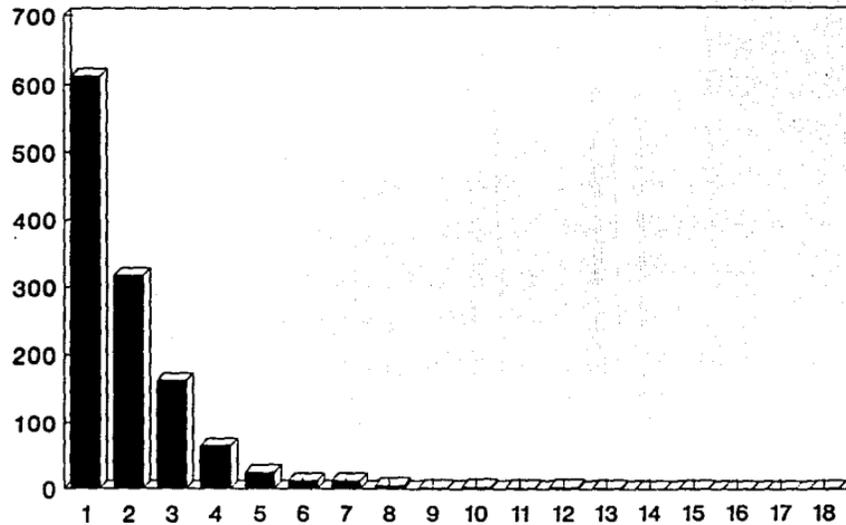


FIGURA 20. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD

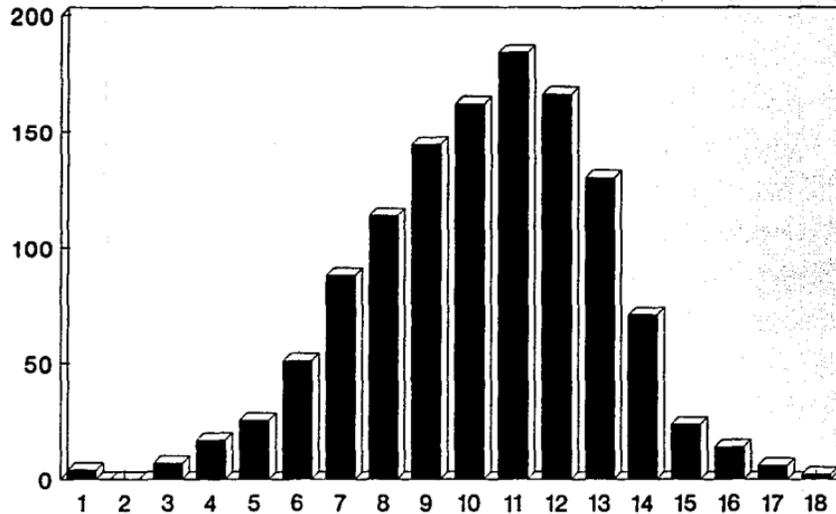


HISTOGRAMA PLOMO



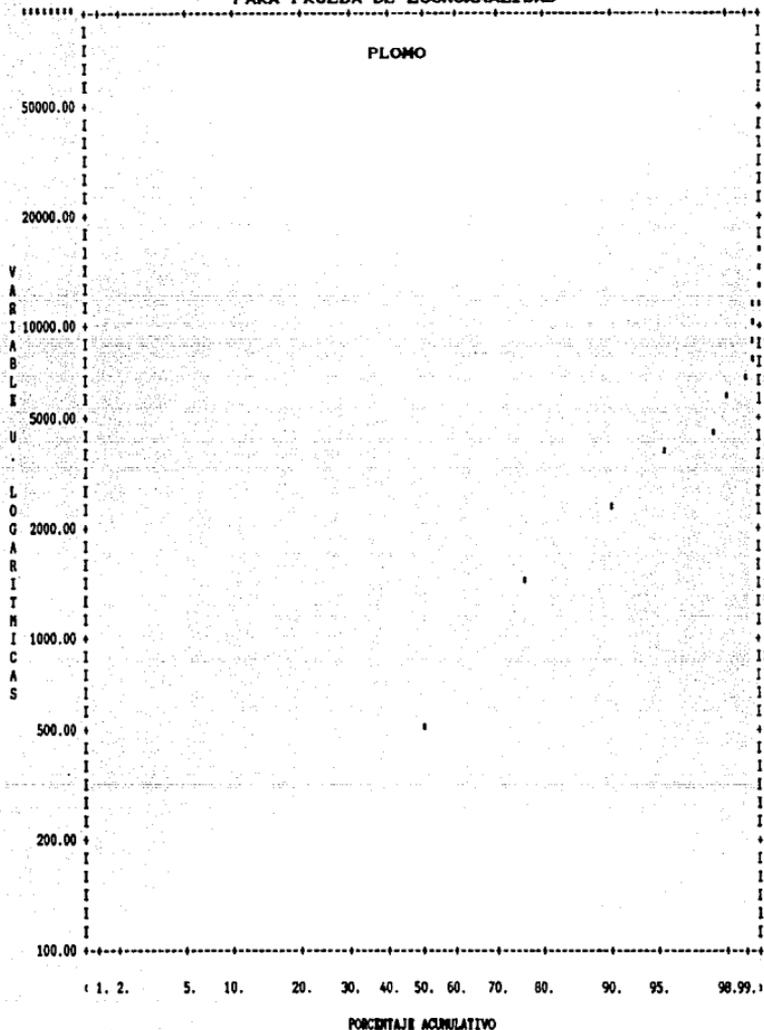
■ FRECUENCIA

HISTOGRAMA LOG PLOMO

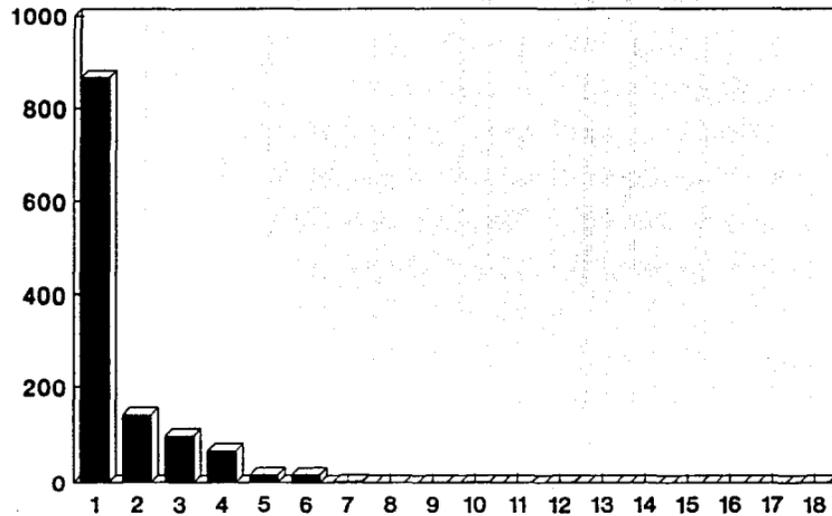


■ FRECUENCIA

FIGURA 23. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD



HISTOGRAMA ZINC



■ FRECUENCIA

HISTOGRAMA LOG ZINC

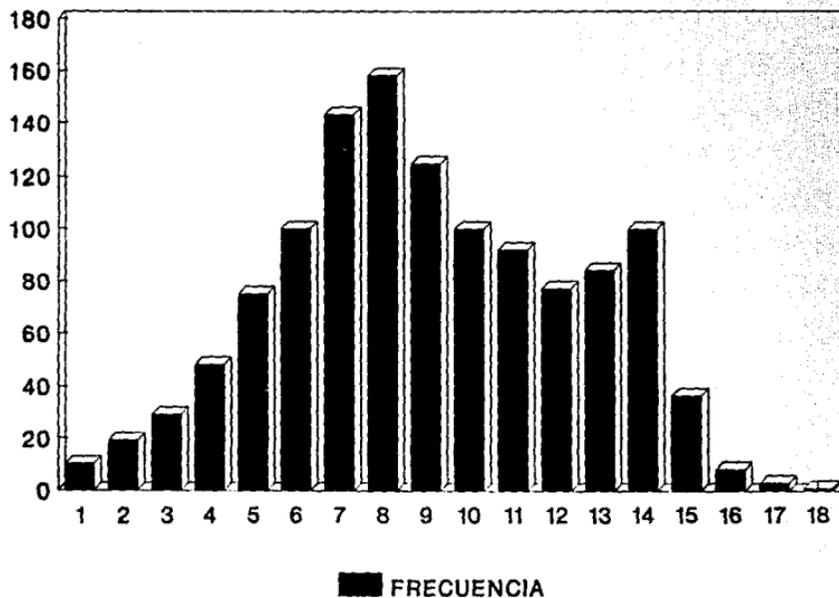
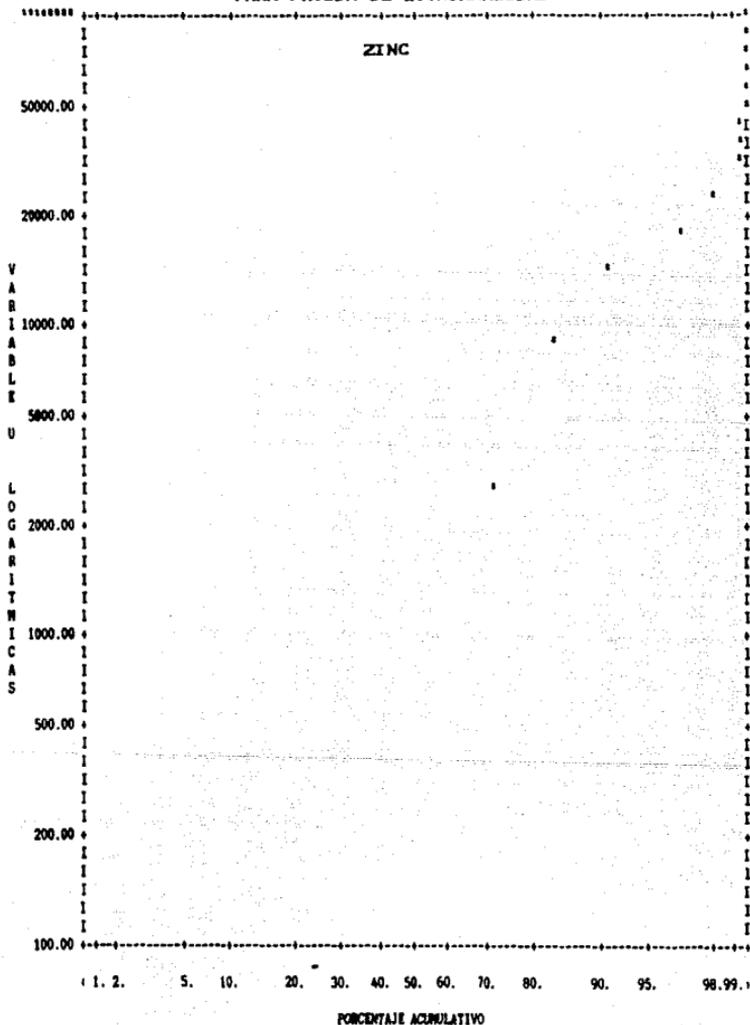
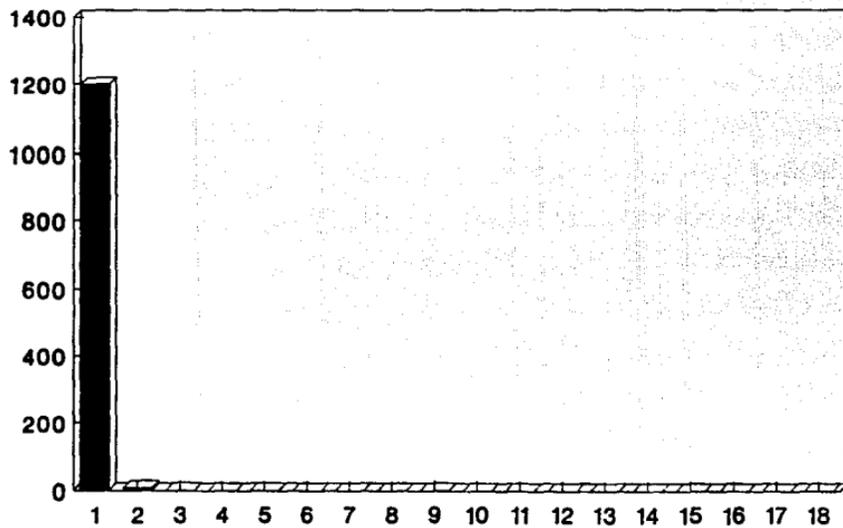


FIGURA 26. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD

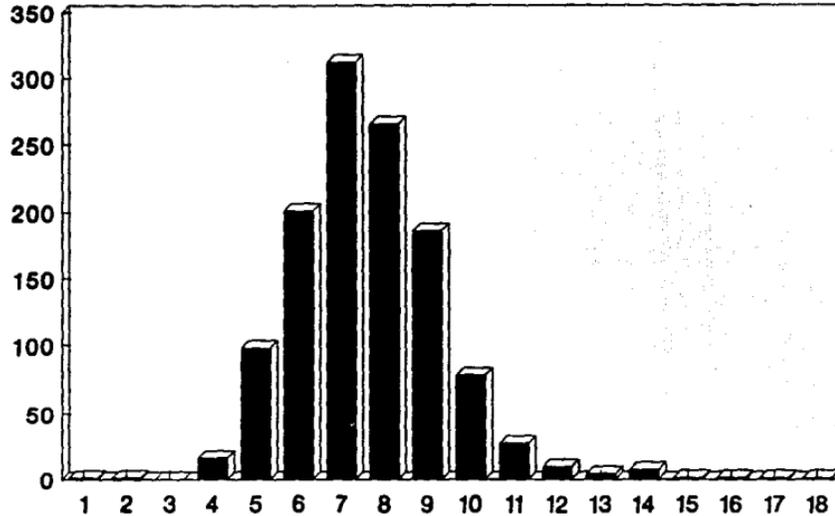


HISTOGRAMA COBRE



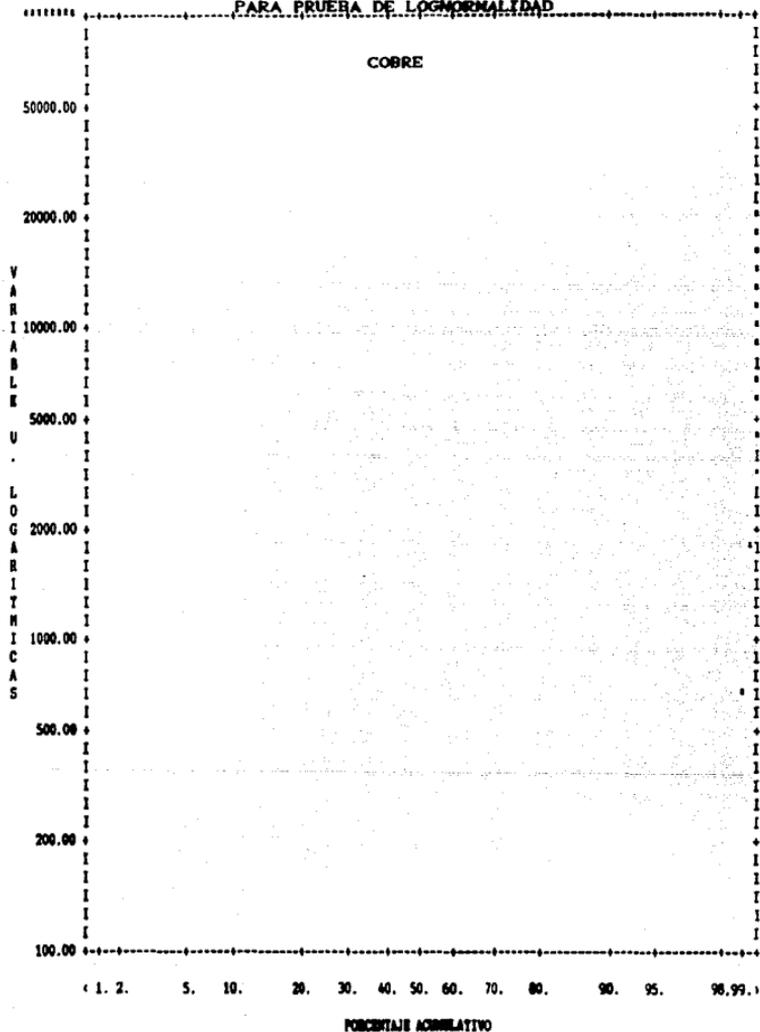
■ FRECUENCIA

HISTOGRAMA LOG COBRE



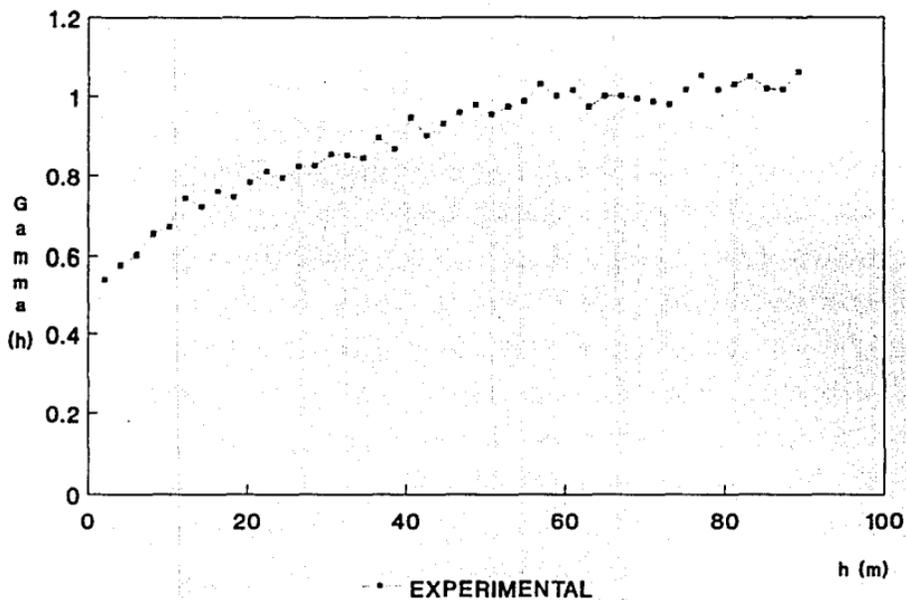
 FRECUENCIA

FIGURA 29. GRAFICA LOGARITMICA PROBABILISTICA Y NORMAL-LOGARITMICA
 PARA PRUEBA DE LOGNORMALIDAD



ANEXO ESTRUCTURAL

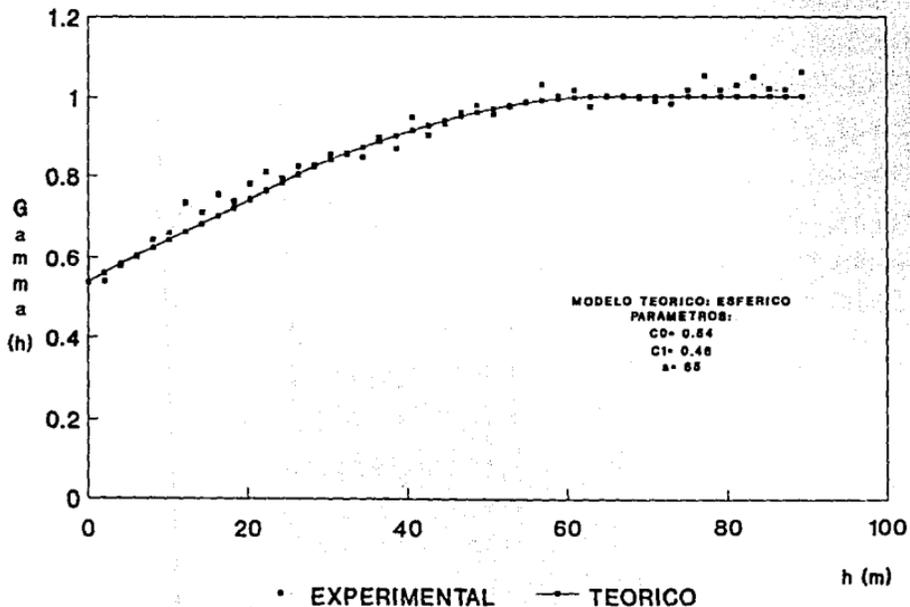
SEMIVARIOGRAMA LOG ORO 2



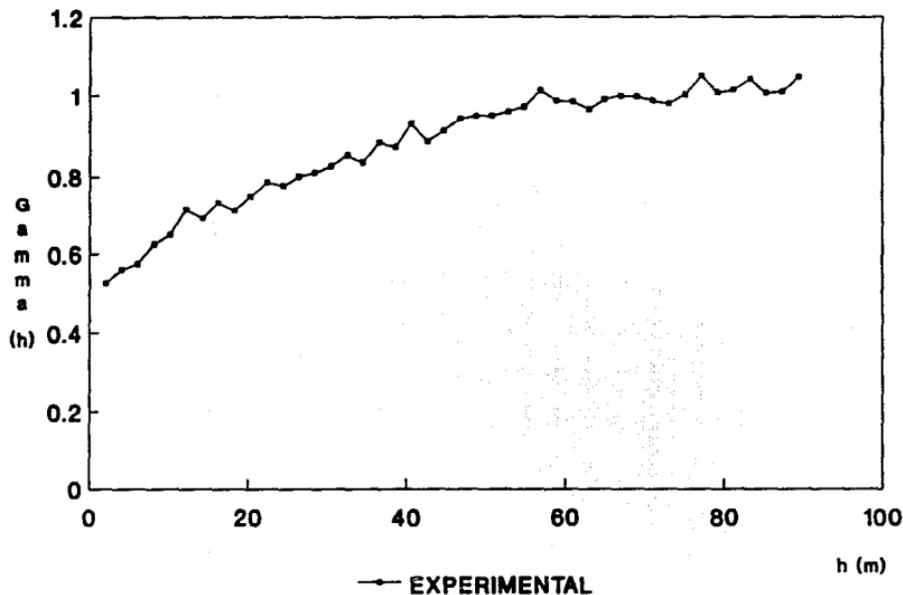
TESIS PROFESIONAL RICARDO GARCIA COLLAZO

FIGURA 30

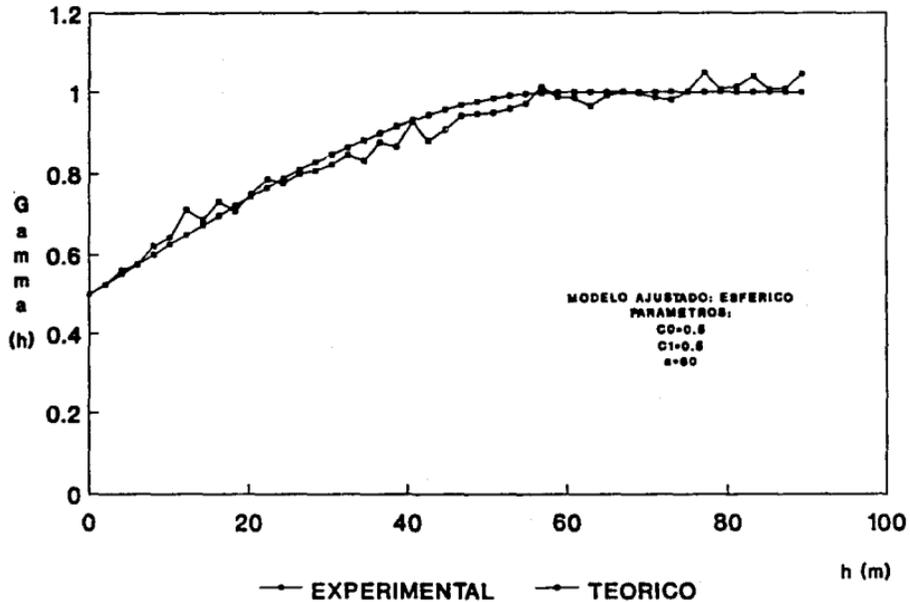
SEMIVARIOGRAMA LOG ORO 2



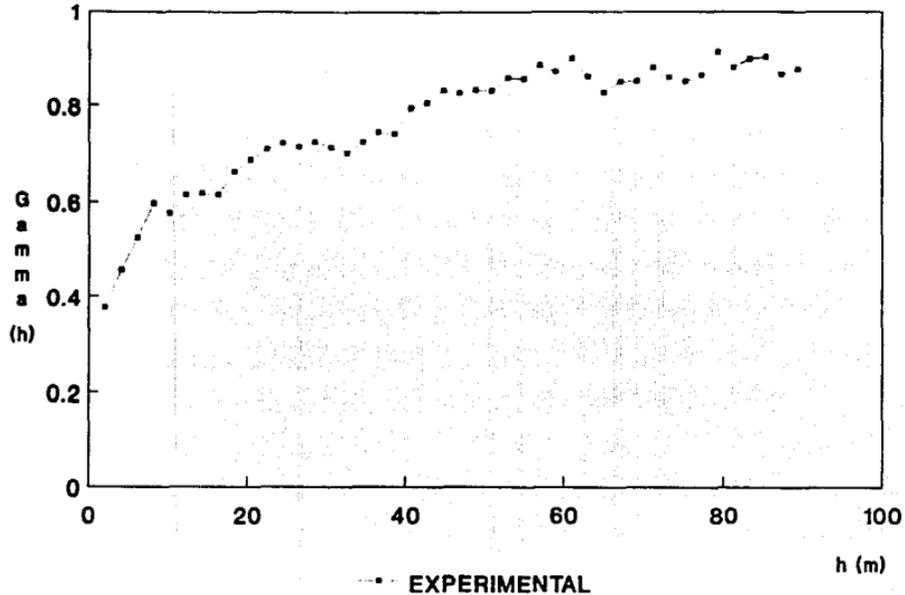
SEMIVARIOGRAMA LOG ORO PROMEDIO



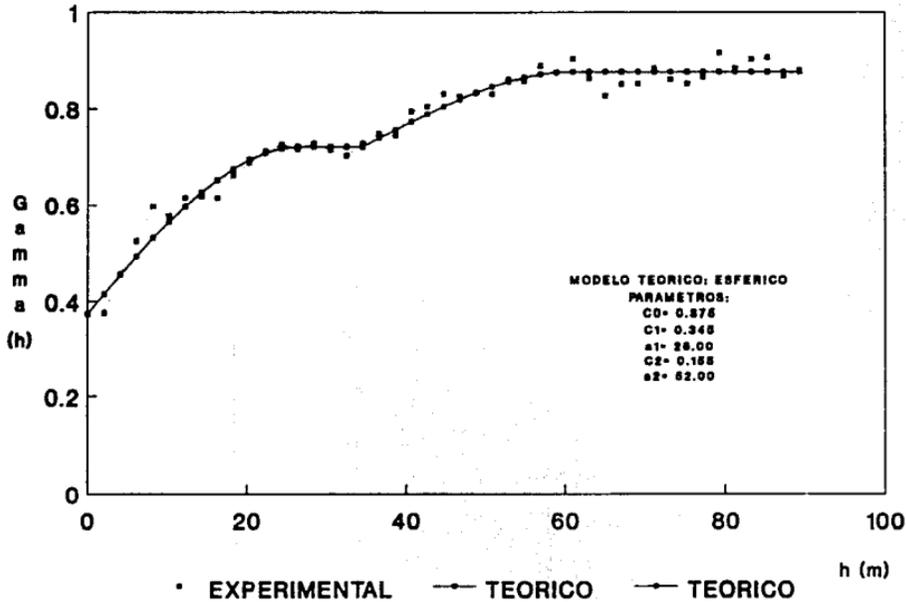
SEMIVARIOGRAMA LOG ORO PROMEDIO



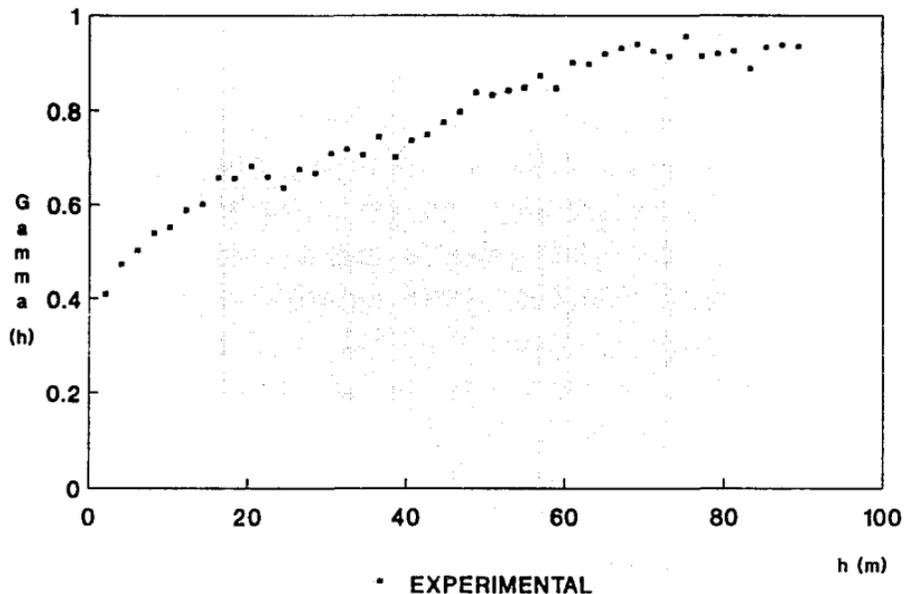
SEMIVARIOGRAMA LOG PLATA



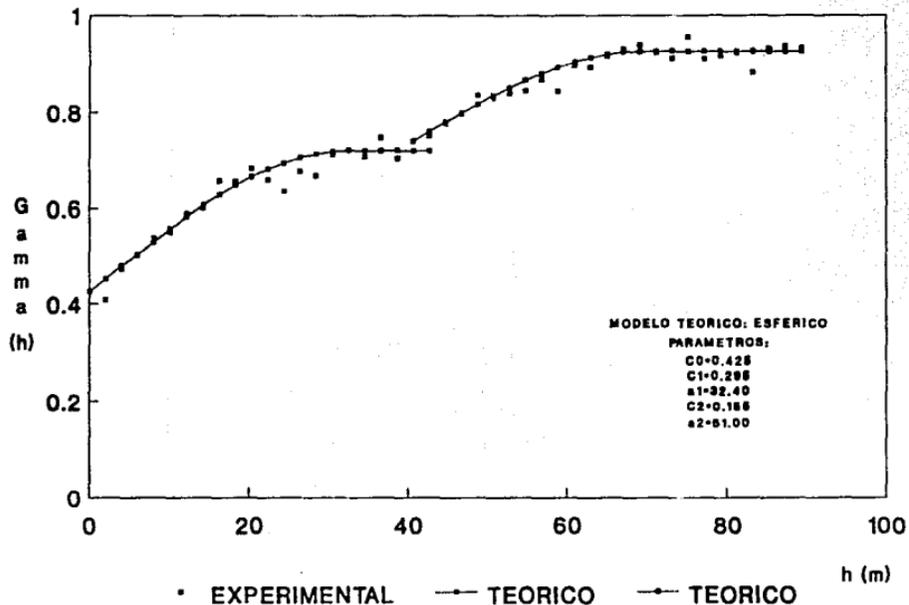
SEMIVARIOGRAMA LOG PLATA



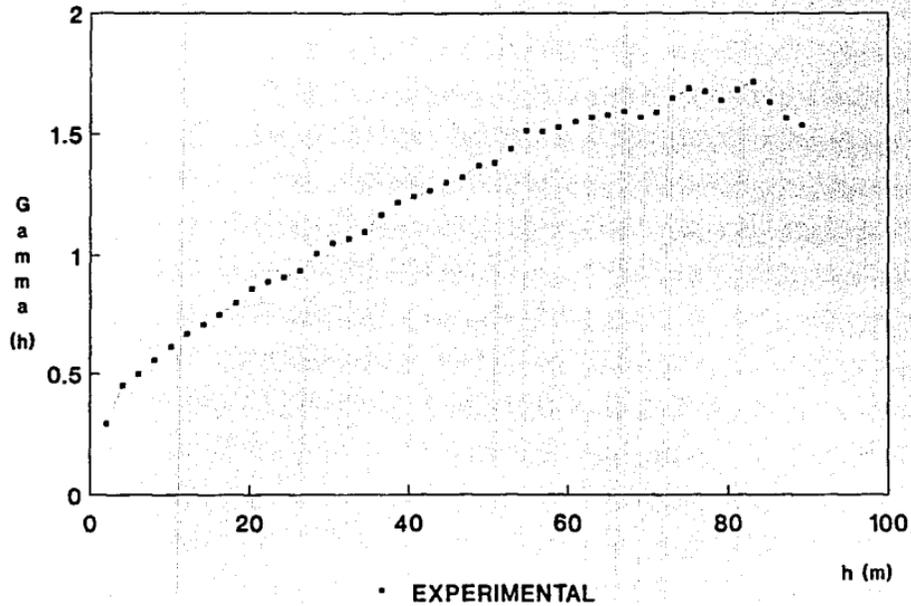
SEMIVARIOGRAMA LOG PLOMO



SEMIVARIOGRAMA LOG PLOMO



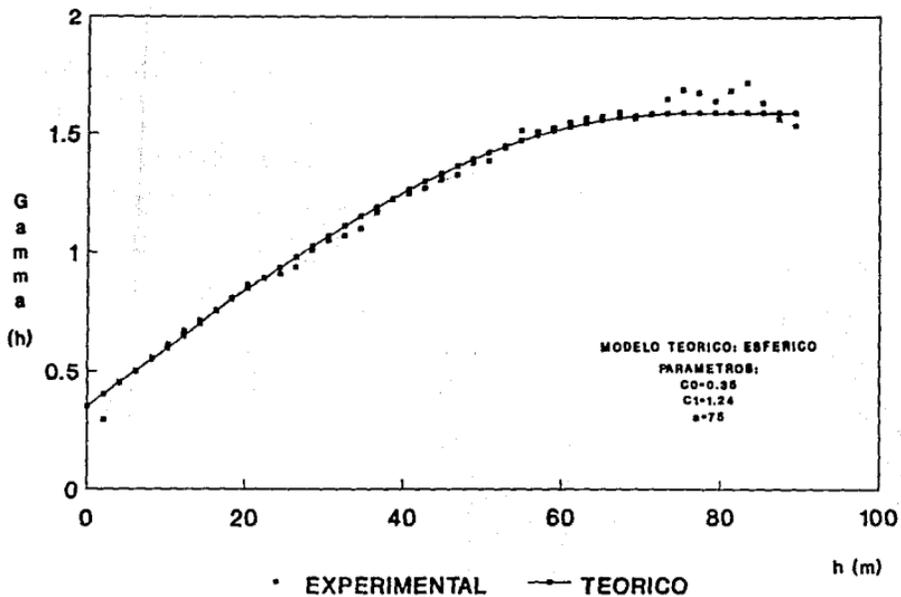
SEMIVARIOGRAMA LOG ZINC



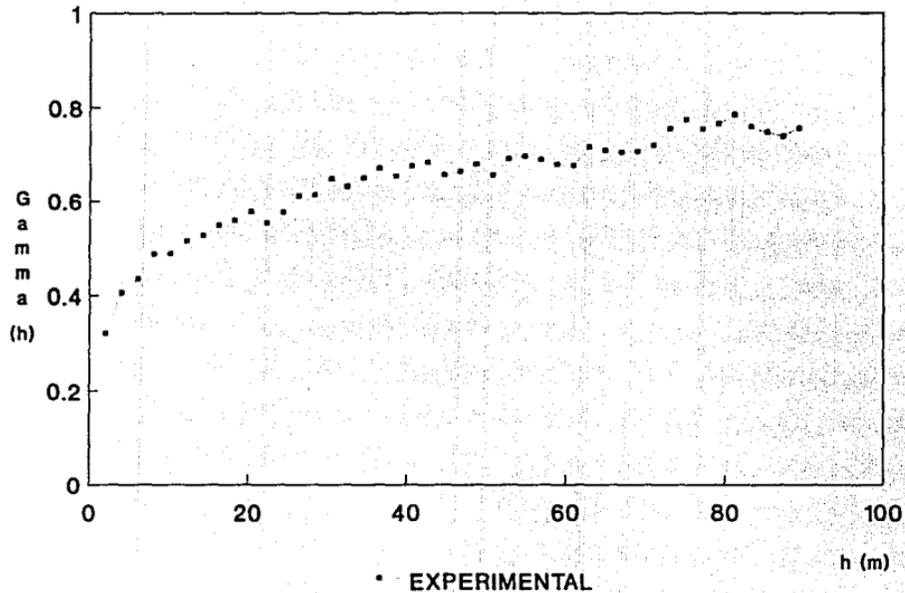
TESIS PROFESIONAL RICARDO GARCIA COLLAZO

FIGURA 38

SEMIVARIOGRAMA LOG ZINC



SEMIVARIOGRAMA LOG COBRE



SEMIVARIOGRAMA LOG COBRE

