



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINEROS POR EL MÉTODO
GEOESTADÍSTICO DEL SISTEMA DE VETAS VICENTE EN LA
UNIDAD MINERA SAN RAFAEL-MINSUR, PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. CESAR AUGUSTO TITO MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios nuestro señor todo poderoso por ser mi guía, mi protección que día a día me lleva por el buen camino, que me da fuerza, voluntad, sabiduría y salud para hacer realidad mis anhelos.

Con mucho amor a mis padres Herminia y Vidal por sus buenos consejos a mis hermanas Carmen, Rosa por su amor y cariño, a Erika por su comprensión y amor incondicional.

A mis maestros por el tiempo y esfuerzo que dedicaron a compartir sus conocimientos, experiencias y su instrucción profesional.

Cesar Augusto



AGRADECIMIENTOS

A la empresa Minsur, Unidad Minera San Rafael a todos los colaboradores del área de geología mina; a los ingenieros y personal técnico por su apoyo y aportes en la elaboración de este trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional del Altiplano mi alma Mater, a los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Geológica por sus conocimientos impartidos durante mi formación académica profesional.

Al ingeniero Agustín Víctor Vélez Vilca por su asesoramiento, observaciones y sugerencias realizadas para la elaboración de este trabajo.

Cesar Augusto



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 14

ABSTRACT..... 15

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA 17

1.3. HIPÓTESIS 18

1.3.1. Hipótesis general 18

1.4. OBJETIVOS 18

1.4.1. Objetivo general 18

1.4.2. Objetivos específicos 18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES 19

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL 22

2.2.1. Formación Sandia (Os-s) 23

2.2.2. Formación Ananea (SD-a) 23

2.2.3. Grupo Ambo (Ci-a) 24

2.2.4. Grupo Tarma (Cs-t) 25

2.2.5. Grupo Copacabana (Pi-c) 25

2.2.6. Grupo Mitu (Ps-mi) 26

2.2.7. Formación Huancané (Ki-hn) 27

2.2.8. Depósitos Cuaternarios 27

2.2.9. Rocas ígneas 30

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 36



2.3.1. Bloque de Putina.....	36
2.3.2. Bloque de Quelhua-Gilata	37
2.3.3. Bloque de Corani-Macusani	38
2.3.4. Bloque de Carabaya.....	39
2.3.5. Depresión de Crucero – Ananea.....	40
2.4. METALOGENIA	40
2.5. MINERAL DE MENA, GANGA Y ESTÉRIL.....	42
2.5.1. Mineral de mena	42
2.5.2. Mineral de ganga	42
2.5.3. Estéril.....	43
2.6. CÓDIGO JORC.....	43
2.6.1. Recursos	44
2.6.2. Reservas.....	48
2.7. CÓDIGO CANADIENSE NATIONAL INSTRUMENT NI 43-101	51
2.7.1. Definiciones.....	51
2.7.2. Requisitos aplicables a la información	54
2.7.3. Comparación con el código JORC	55
2.8. ESTIMACIÓN DE RECURSOS.....	55
2.9. MÉTODOS TRADICIONALES DE ESTIMACIÓN.....	57
2.10. MÉTODO GEOESTADÍSTICO.....	63
2.10.1. Método del kriging ordinario.....	64
2.10.2. Teoría de las variables regionalizadas	67
2.11. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	
.....	68
2.11.1. Medidas de centralización, dispersión y forma	68
2.11.2. Distribución de frecuencias	73
2.11.3. Histogramas	73
2.11.4. Gráficos probabilísticos.....	74
2.11.5. Valor capping	74
2.11.6. Compositación.....	75
2.12. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	75
2.12.1. Variable regionalizada.....	75
2.12.2. Función aleatoria	76
2.12.3. Variograma y variografía	76



2.12.4. Modelamiento del variograma.....	81
2.12.5. Elipsoide de influencia	82
2.13. MUESTREO GEOLÓGICO	83
2.13.1. Importancia del muestreo	83
2.13.2. Objetivo del muestreo.....	84
2.13.3. Cualidades necesarias de una muestra.....	85
2.14. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD QA/QC	86
2.14.1. Aseguramiento de la calidad	87
2.14.2. Control de calidad.....	89
2.14.3. Programa de control de calidad	92
CAPÍTULO III	
MÉTODOS Y MATERIALES	
3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	96
3.1.1. Tipo de la investigación.....	96
3.1.2. Diseño de la investigación.....	96
3.1.3. Definición de variables.....	97
3.1.4. Población y muestras	97
3.1.5. Etapas de la investigación	97
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	109
CAPÍTULO IV	
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	
4.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD	111
4.2. CLIMA Y VEGETACIÓN	112
4.3. GEOMORFOLOGÍA	113
4.3.1. Montaña Cordillerana.....	113
4.3.2. Lomas	114
4.3.3. Valles Glaciares.....	114
4.3.4. Valles Fluviales	115
4.3.5. Ladera Cordillerana	115
4.3.6. Colinas Intracordilleranas.....	115
4.4. GEOLOGÍA LOCAL.....	115
4.4.1. Formación Sandia (O-s)	116
4.4.2. Grupo Ambo (Ci-a)	116
4.4.3. Depósitos Cuaternario Aluvial/Morrena (Q-al).....	116



4.4.4. Rocas Intrusivas.....	117
4.4.5. Yacimiento mineral	120
4.4.6. Geología Estructural	120
4.4.6.1. Controles estructurales del sistema de vetas Vicente	122
4.4.7. Vetas y cuerpos.....	122
4.4.7.1. Vicente Piso.....	122
4.4.7.2. Vicente Centro.....	123
4.4.7.3. Vicente Ramal Piso	123
4.4.7.4. Vicente Centro Piso	124
4.4.8. Alteración Hidrotermal.....	126
4.4.9. Mineralización y paragénesis	127
CAPÍTULO V	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
5.1. ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE RECURSOS MINERALES	129
5.1.1. Generación del modelo geológico tridimensional	129
5.1.2. Base de datos del área en estudio	130
5.1.3. Selección de datos	131
5.1.4. Análisis exploratorio de datos	132
5.1.5. Análisis estructural	140
5.1.6. Estimación de recursos minerales	143
5.1.7. Validación de la estimación de recursos	146
5.2. CATEGORIZACIÓN Y INVENTARIO DE RECURSOS.....	149
5.2.1. Reservas.....	155
5.2.2. Discusión	158
VI. CONCLUSIONES	160
VII. RECOMENDACIONES	162
VIII. REFERENCIAS	163
ANEXOS.....	168

Área: Geología de minas

Tema: Estimación de recursos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 22 de julio 2021



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Mapa geológico regional del área de estudio.....	29
Figura 2:	Columna estratigráfica generalizada del cuadrángulo de Macusani (INGEMMET, 1996).	30
Figura 3:	Cordillera Oriental, Franja Estannífera Perú-Bolivia-Argentina (Lehmann, 1979).	41
Figura 4:	Mapa metalogénico del Perú, mostrando la franja XIX de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Oligoceno-Mioceno (INGEMMET).....	42
Figura 5:	Relación general entre Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (Código de JORC, 1999).....	46
Figura 6:	Ejemplo bidimensional. Existe una agrupación de datos (Alfaro, 2007). ...	58
Figura 7:	Método de los polígonos (Alfaro, 2007).....	59
Figura 8:	a) El triángulo en cuyos vértices están las muestras es un plano inclinado. b) método geométrico para obtener el estimador	60
Figura 9:	Distancias (d_i) entre las muestras (+) y el punto a estimar (o) (círculo negro); v_i son los valores de las muestras (Fernández y Tessone, 2015). ...	61
Figura 10:	Vecindad de estimación (Alfaro, 2007).	67
Figura 11:	Un testigo, tiene un cierto largo L y un cierto diámetro D. (Alfaro, 2007). ...	68
Figura 12:	Localización de la media, mediana y moda (Gorgas, Cardiel y Zamora, 2011).	70
Figura 13:	Distribución con asimetría hacia la derecha, positiva, (panel a), simétrica (panel b)	72
Figura 14:	Histograma (Ortiz, 2006).	73
Figura 15:	Modelos de histogramas (Ortiz, 2006).....	74
Figura 16:	Muestras original y compositada (Universidad de Chile, 2014).....	75
Figura 17:	Dos puntos a la distancia vectorial h. (Alfaro, 2007).	77
Figura 18:	Representación gráfica de un variograma básico. (Canchaya, 2005).	78
Figura 19:	Tipos de tolerancia: I - construcción según tolerancia angular en torno a la dirección de azimut θ	80
Figura 20:	Variograma experimental vs variograma teórico. (Alfaro, 2007).....	81
Figura 21:	Elipsoide de influencia. (Marín, 1978).	83
Figura 22:	Precisión vs Exactitud. (Simón, 2005).....	91



Figura 23: Flujograma de la metodología seguida para la elaboración del proyecto de investigación.	96
Figura 24: Muestreo sistemático de canales. (Manual de muestreo geológico Minsur, 2019).	100
Figura 25: Toma de muestras gemelas. (Manual de muestreo geológico Minsur, 2019).	101
Figura 26: Diagrama de flujo de la estimación de recursos minerales.....	109
Figura 27: Mapa de ubicación geográfica de la unidad minera San Rafael.	112
Figura 28: Columna estratigráfica local (San Rafael).	118
Figura 29: Mapa geológico local (Minsur).....	119
Figura 30: Mapa estructural local (Minsur).....	121
Figura 31: Sondajes diamantino que cortan la veta San Rafael y Vicente	125
Figura 32: Veta San Rafael y Vicente	126
Figura 33: Etapas de mineralización (Palma, 1981).....	128
Figura 34: Generación del sólido 3-D por el método de los perfiles.....	129
Figura 35: Vista tridimensional de los sólidos del sistema de vetas Vicente.....	131
Figura 36: Vista en planta de los sólidos del sistema de vetas Vicente	132
Figura 37: Veta Vicente Piso. A). Poblacion de datos sesgada hacia la derecha, con una media de 1.296 y leyes mayores al 30 %Sn.....	133
Figura 38: Veta Vicente Centro P1. A). Distribución asimétrica positiva y valores altos que van del rango de 20 a 25 %Sn.....	134
Figura 39: Veta Vicente Centro P2. A). Datos dispersos que no parecen pertenecer a la población (Outliers).	134
Figura 40: Veta Vicente Ramal Piso. A). La mayor frecuencia de datos se encuentra entre 0 y 0.50, teniendo una media poblacional de 4.294.....	135
Figura 41: Veta Vicente Centro Piso. A). La mayor frecuencia de datos se encuentra entre 0 y 0.50, Se tienen leyes mayores al 35 %Sn.....	135
Figura 42: Valor capping del sistema de vetas Vicente.	137
Figura 43: El 98% de muestras de la veta Vicente Piso tienen longitudes de muestreo < 2 m.	139
Figura 44: Variogramas experimentales en las diferentes direcciones.	140
Figura 45: Variograma modelado de la veta Vicente Ramal Piso.....	141
Figura 46: Elipsoide de influencia vista en sección longitudinal.	142
Figura 47: Elipsoide de influencia vista en planta.....	142



Figura 48: Prototipo de trabajo.....	144
Figura 49: Validación local de la estimación de recursos.	147
Figura 50: Validación visual de la estimación de recursos	149
Figura 51: Tonelaje y ley de recursos del sistema de vetas Vicente.	151
Figura 52: Distribución del tonelaje del sistema de vetas Vicente.....	152
Figura 53: Tonelaje y ley de recursos medidos e indicados.....	153
Figura 54: Distribución de tonelaje del recurso medido e indicado.....	153
Figura 55: Vista longitudinal 3-D de la categorización de recursos.	154



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Frecuencias recomendadas de muestras de control.....	95
Tabla 2: Longitud y ancho de muestreo.	101
Tabla 3: Límites máximos y mínimos de detección.	105
Tabla 4: Datos de densidades aparentes del sistema de vetas Vicente.....	107
Tabla 5: Coordenada UTM del área de estudio.....	111
Tabla 6: Primera y más común vía de acceso a la unidad minera San Rafael.	111
Tabla 7: Segunda vía de acceso a la unidad minera San Rafael.....	112
Tabla 8: Cantidad de data empleada por estructura.....	132
Tabla 9: Estadística de la data inicial.	136
Tabla 10: Valor capping del sistema de vetas Vicente.....	138
Tabla 11. Estadísticas de la data compositada.	139
Tabla 12: Estadísticas comparativas de la data inicial y compositada.	140
Tabla 13: Parámetros variograficos modelados.	141
Tabla 14: Datos de densidades aparentes.	143
Tabla 15: Tamaño de bloques.....	145
Tabla 16: Elección del elipsoide de búsqueda y numero de compósitos.	145
Tabla 17: Validación global de la estimación de recursos.	148
Tabla 18: Tonelajes y leyes promedios del sistema de vetas Vicente.....	151
Tabla 19: Clasificación, resultados e inventario de recursos.	152
Tabla 20: Tonelajes y leyes promedios, medidos e indicados.....	153
Tabla 21: Categorización de recursos en medidos, indicados e inferido.	154



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

Siglas:

CIM	:	Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo
E.D.A	:	Análisis exploratorio de datos
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
JORC	:	Joint Ore Reserves Committee
NI 43-101	:	National Instrument 43-101
QA/QC	:	Quality Assurance/Quality Control
UTM	:	Universal Transverse Mercator
EPP	:	Equipo de protección personal

Unidades de medida:

°C	:	Grados centígrados
cm	:	Centímetros
gr	:	Gramos
km	:	Kilómetros
km ²	:	Kilómetros cuadrados
m.s.n.m	:	Metros sobre el nivel del mar
m	:	Metros
mm	:	Milímetros
tn	:	Toneladas
t/m ³	:	Toneladas por metros cúbicos
tmf	:	Toneladas métricas finas
%	:	Porcentaje

Abreviaturas:

AA	:	Absorción atómica
Ar	:	Argón
Ci-a	:	Grupo Ambo
Cs-t	:	Grupo Tarma
Cu	:	Cobre
<i>cv</i>	:	Coefficiente de variación
Cz	:	Cuarzo
DS-a	:	Formación Ananea
E	:	Este (Punto cardinal)
$F(x)$:	función de distribución
ID2	:	Inverso a la distancia al cuadrado
K	:	Potasio
KO	:	Kriging Ordinario
LECO	:	Espectrometría de masa
LPD	:	límites permisibles de detección
Ma	:	Millones de años
<i>Me</i>	:	Mediana
<i>Mo</i>	:	Moda
N	:	Norte (Punto cardinal)
NN	:	Vecino más cercano



Oim-si	:	Grupo San José
Os-s	:	Formación Sandía
Pi-c	:	Grupo Copacabana
Ps-mi	:	Grupo Mitu
Q-fg	:	Depósitos Fluvioglaciares
Q-al	:	Depósitos Aluviales
Rb	:	Rubidio
S	:	Sur (Punto cardinal)
Sr	:	Estroncio
Sn	:	Estaño
SN	:	Subnivel
V.R	:	Variable regionalizada
Ve	:	Estimador
W	:	Oeste (Punto cardinal)
W	:	Wolframio
\bar{x}	:	Media aritmética



RESUMEN

El yacimiento minero San Rafael se ubica en el nevado de Quenamari de la cordillera de Carabaya, políticamente está ubicado en el Distrito de Antauta, Provincia de Melgar, Departamento de Puno, a una altitud de 4.500 m.s.n.m. Las rocas de la Formación Sandia han sido intruidas por dos stocks graníticos Terciarios, la mineralización es de origen hidrotermal en vetas de relleno y reemplazamiento de fracturas y cuerpos de mineral en el monzogranito y en los metasedimentos. El objetivo del estudio fue estimar los recursos minerales por el método geoestadístico del sistema de vetas Vicente, en base a la geología y geoestadística, teniendo en consideración los procedimientos aplicables del código JORC y la norma canadiense NI 43-101. La metodología empleada fue de tipo descriptivo, analítico y propositivo considerando para ello fases o etapas durante la investigación, para la estimación de recursos se hace uso del software de modelamiento y estimación Datamine. La data empleada consta de: perforación diamantina y canales de muestreo; para la interpretación geológica y posterior generación del sólido 3-D, se contó con información de planos geológicos y de muestreo. El interpolador geoestadístico que se empleó para la estimación de recursos minerales fue el kriging ordinario, como también el interpolador vecino más cercano e inverso a la distancia al cuadrado, los cuales son empleados en el proceso de validación de resultados, para verificar que no existan sesgos muy marcados entre estos distintos interpoladores. Los resultados vertidos en este trabajo como recursos minerales medidos se tienen 2,444,444Tn con una ley de 2.34%Sn, recursos indicados 1,311,827Tn con una ley de 0.96%Sn y recursos inferidos 350,869Tn con una ley de 0.51%Sn.

Palabras Clave: Evaluación económica, geoestadística, recursos mineros, sistema de vetas.



ABSTRACT

The San Rafael ore deposit is located in the Quenamari snow-capped mountain range of Carabaya, politically located in the District of Antauta, Province of Melgar, Department of Puno, at an altitude of 4,500 meters above sea level. The rocks of the Sandia Formation have been intruded by two Tertiary granitic stocks, the mineralization is of hydrothermal origin in filling veins and replacement of fractures and ore bodies in the monzogranite and metasediments. The objective of the study was to estimate the mineral resources by the geostatistical method of the Vicente vein system, based on geology and geostatistics, taking into consideration the applicable procedures of the JORC code and the Canadian NI 43-101 standard. The methodology used was descriptive, analytical and propositive, considering phases or stages during the investigation, for the estimation of resources using Datamine modeling and estimation software. The data used consists of: diamond drilling and sampling channels; for the geological interpretation and subsequent generation of the 3-D solid, information from geological and sampling plans was used. The geostatistical interpolator used for the estimation of mineral resources was the ordinary kriging, as well as the nearest neighbor and inverse squared distance interpolator, which are used in the process of validation of results, to verify that there are no marked biases between these different interpolators. The results of this work as measured mineral resources are 2,444,444Tn with a grade of 2.34%Sn, indicated resources 1,311,827Tn with a grade of 0.96%Sn and inferred resources 350,869Tn with a grade of 0.51%Sn.

Keywords: Economic evaluation, geostatistics, mineral resources, vein system.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El escándalo Bre-X relacionado con el depósito de oro Busang en Indonesia hizo evidente la necesidad de implementar estándares internacionales y un mayor control de la información sobre minerales. Es por ello que para llevar a cabo un proyecto o en todo caso una operación minera es necesario contar con información geológica precisa y certera, la cual permita generar una adecuada estimación de recursos minerales, esta información debe proceder de sondajes diamantinos y muestras sistemáticas de canales, así mismo deberá estar respaldado por ciertas normas y estándares que regulan las buenas prácticas en la industria mineras como son: el código JORC y la norma canadiense NI 43-101.

Dentro de las técnicas de estimación geoestadística esta la interpolación por el método del kriging ordinario en la cual se emplearon data de taladros diamantinos y muestras de canales sistemáticos, se generaron los histogramas normales y logarítmicos las cuales evidencian un adecuado tratamiento de la data inicial, se obtuvieron variogramas en las diferentes direcciones mostrando la existencia de una anisotropía direccionada, con todos estos datos se estimó la ley de estaño del sistema de vetas Vicente.

Además del kriging ordinario se utilizó el interpolador del inverso a la distancia al cuadrado y vecino más cercano, esto con el fin de realizar validaciones y comparaciones de resultados, confirmando que la estimación por el interpolador kriging ordinario no presenta sesgos importantes.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de implementación de un procedimiento adecuado para la estimación geoestadística de recursos minerales que representé mejor la distribución de leyes en un



modelo de bloques 3-D la cual deberá guardar relación con algún código o protocolo internacional que guíe la categorización adecuada de recursos, siendo dos de los más aceptados el código JORC y la norma canadiense NI 43-101 (National Instrument).

El código JORC (Joint Ore Reserves Committee), es el código australiano que establece los estándares mínimos, las recomendaciones y normas para la información pública de resultados de exploraciones, recursos minerales y reservas de mena.

La norma canadiense NI 43-101 es la pauta estricta que considera la manera como las compañías divulgan la información científica y técnica, sobre los proyectos mineros, ampliamente comparable con el código JORC, que regula la publicación de los informes de exploración de minerales y presentación de informes de recursos y reservas de minerales; la norma NI 43-101 es más prescriptiva porque presenta la información geológica.

La estimación geoestadística permite una adecuada valoración económica, determinar la extensión y el tamaño de bloque del modelo geológico 3-D de los recursos presentes en el sistema de vetas Vicente, que es primordial en la evaluación de una operación minera.

Ante las consideraciones señaladas anteriormente, se plantea la siguiente interrogante de investigación.

¿Será posible estimar los recursos minerales por el método geoestadístico del sistema de vetas Vicente en la unidad minera San Rafael-MINSUR, Puno?

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los métodos tradicionales de estimación de recursos minerales aun proporcionan valores de estimación, cercanos a la realidad, sujeta de credibilidad y confianza para



depósitos de minerales bondadosos en sus valores de ley y tonelaje, sin embargo, no se puede decir lo mismo para depósitos con leyes y tonelajes no muy atractivos. En la mina San Rafael en los últimos años se ha visto una disminución de tonelaje y un ligero incremento de ley de estaño, es por esta razón, nos encontramos en la necesidad de implementar un procedimiento de estimación geoestadística de recursos para conocer el potencial minero y así mismo sugerir nuevos targets de exploración. Dicha metodología será empleada en la estimación de recursos semestrales y anuales, teniendo un uso constante que estará sujeta a modificaciones, las cuales deberán ajustarse a las operaciones.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

La estimación de recursos minerales del sistema de vetas Vicente en base al conocimiento geológico y geoestadístico permitirá tomar la mejor decisión posible frente a la cuantificación en el contenido de tonelajes y leyes, sugerir o producir un modelo de bloques tridimensional adecuado para el desarrollo de recursos minerales.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Estimar los recursos minerales por el método geoestadístico del sistema de vetas Vicente, en la Unidad Minera San Rafael-MINSUR, Puno.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estimar los recursos minerales sin sesgos significativos en leyes, tonelajes y cantidad de metal.
- Categorizar los recursos minerales en Medido, Indicado e Inferido de acuerdo con el nivel de confiabilidad en la estimación.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Salinas (2012). Estimación de recursos en un yacimiento de fierro, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Santiago de Chile. La geoestadística es una disciplina que estudia fenómenos regionalizados (es decir, fenómenos que presenten una estructura espacial). Provee herramientas fundamentales para la estimación de variables regionalizadas tales como ley, contenido de contaminantes, densidad y razones tales como solubilidad o magnetismo. Por lo tanto, la geoestadística es la herramienta utilizada para generar un fidedigno reporte de recursos recuperables en un yacimiento. Lo que se hace es calcular una varianza bajo la cual el bloque se considere como recurso medido y otra varianza sobre la cual el bloque se considere como recurso inferido. Entre medio quedan los recursos indicados.

Altamirano (1996). Estimación Geoestadística del Cuerpo Mineralizado Magistral, Sur de la CIA. Minerales Santander y su Sensibilidad Económica en su Explotación, Lima Perú. Informe de ingeniería desarrollada con el objetivo de aplicar las herramientas geoestadísticas. Se obtiene una gran ventaja trabajar con el método geoestadístico debido a que es un método robusto, bien sustentado y por tener los resultados en la computadora. En nuestro caso: se sabe que debajo del banco 7 el cuerpo mineral no es suficientemente conocido, entonces conforme avance la explotación del tajo y tengamos nuevos datos de muestreo (taladros diamantinos, etc) estos podrán ser alimentados a la computadora y obtener los nuevos resultados rápidamente de zonas desconocidas y un ajuste más real de las que fueron conocidas.



Báez (2018). Metodología Geoestadística Aplicada a la Estimación de Recursos de la Veta Bertha, San Miguel de Cauri, Lauricocha - Huánuco. Tesis desarrollada con el objetivo de implementar una metodología con el uso de la geoestadística y la informática, que permita encontrar la estimación de recursos de la veta Bertha. La teoría de variables regionalizadas del Dr. G. Matherón, conocida comúnmente como geoestadística, es la herramienta que mejor ha representado la ocurrencia de los elementos metálicos en la naturaleza, debido a que utiliza características fundamentales como el valor de ley mineral y coordenadas UTM, resolviendo de esta manera muchos de los problemas de ingeniería que se producen en cuerpos de un yacimiento minero.

Espinoza (2018). Para la actividad geológica contar con una metodología de estimación que permita estimar el recurso y su distribución mediante un modelo de bloques apropiado a la Geología en estudio, de forma que constituya una información que sea auditable es fundamental para el logro de financiamiento. La metodología de estimación deberá guardar o tener relación con algún protocolo, código u estándar, toda vez que es un bien que tiene que cuantificarse en forma global existiendo para ello diferentes estándares, siendo uno de los más aceptable es el código JORC. El código de JORC, australiano para informar sobre resultados de exploración y cuantificación del recurso. Este código establece estándares mínimos, recomendaciones y normas para la presentación de información pública, sobre resultados de exploraciones, recursos minerales y reservas de mena.

Quispe (2017). Estudio Geológico y Estimación de Recursos del Proyecto Ayahuay, Antabamba – Apurímac. Tesis desarrollada con el objetivo de determinar las características geológicas del yacimiento y posteriormente desarrollar un modelo geológico tridimensional y realizar la estimación de recursos con un alto nivel de confiabilidad. La estimación de recursos de un proyecto minero constituye el primer



eslabón de la cadena del negocio minero. Si éstos son definidos con una alta probabilidad de error, todos los procesos posteriores, entre ellos el diseño de la mina, la planificación y evaluación del proyecto, podrían ocasionar pérdidas económicas a futuro. Si bien resulta inimaginable generar una estimación de recursos exentos de error, es fundamental que los parámetros definidos para la evaluación de recursos aseguren una desviación razonable, que no impacte de manera desmedida los procesos posteriores.

Rodriguez (2015). La veta Vicente Centro está compuesta por una brecha con clastos de intrusivos con venillas de casiterita envueltos en una matriz de cuarzo cristalino, es decir que en los clastos se encuentra la casiterita y no en la matriz, en las estaciones realizadas no se muestra que el cuarzo este asociado a casiterita, por lo cual se trata de un cuarzo tardío que afecto a las venillas de casiterita. Las venillas que se encuentran al Este de la veta Vicente Centro corresponden a ramales de una veta ubicada más al Oeste denominada en este nivel como Vicente Piso. Revisando los perfiles del departamento de geología es notorio que la veta San Rafael se estrangula y ramifica en profundidad y comienzan a abundar las venillas de casiterita. También se observa que la veta Vicente Piso comienzan a tener más continuidad en profundidad; en ese sentido, se propone que la continuidad de la mineralización de la veta San Rafael continua en la veta Vicente.

Snowden (2013). En su informe técnico. Minsur es una empresa minera con recursos de clase mundial, los cuales han sido operados de forma rentable durante décadas. La compañía se encuentra actualmente enfrascada en llevar los procedimientos de estimación de sus recursos y reservas a los niveles más altos de los estándares internacionales. Esta revisión se refiere solamente a los pasos requeridos para permitir que la empresa se adecue a los estándares internacionales del código JORC 2012, para la clasificación y reporte de los recursos y reservas.



2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

En la región se extiende una gruesa secuencia marina del Paleozoico inferior tales como: pizarras, filitas y cuarcitas de la Formación Sandia de edad Ordovícico superior; y limoarcilitas intercaladas con cuarcitas del Grupo Ananea, del Devónico-Silúrico. Toda la serie litológica descrita anteriormente ha sufrido los efectos de la tectónica compresiva herciniana temprana. Asimismo, las rocas del Paleozoico superior han sufrido los efectos de la tectónica herciniana final, representada por areniscas y lutitas del Grupo Ambo, de edad Missisipiano; lutitas y calizas del Grupo Tarma, de edad Pensilvaniano; y calizas del Grupo Copacabana, de edad Pérmico inferior. El tectonismo fue seguido por un levantamiento continental que dio origen a los sedimentos continentales y volcanismo de edad Pérmico medio a superior, sobre los cuales se depositaron secuencias calcáreas, arenosas y lutíticas del Cretáceo. (Laubacher, 1978 y Kontak, 1984).

Las rocas paleozoicas de la cordillera de Carabaya fueron instruidas por rocas peraluminosas de los plutones Limacpampa, Limbani, Aricoma y Coasa, agrupados en el batolito de Coasa, de edad Triásico. Hacia el noroeste se encuentra un plutón de sienita nefelínica peraluminosas y volcánicos per alcalinos, ambos del Jurásico (Kontak, 1991).

En la depresión de Crucero y en las estribaciones de la cordillera o precordillera de Carabaya existen rocas ígneas extrusivas e hipabisales del terciario. Las rocas extrusivas comprenden lavas y piroclásticos, basaltos, shoshonitas, riocacitas y riolitas del tipo S, además, intrusivos hipabisales peraluminosos emplazados entre los 22Ma. y 26Ma; del Oligoceno superior, Mioceno inferior. Otro tipo de rocas comprende piroclásticos e hipabisales riolíticos fuertemente peraluminosos con biotita, sillimanita, muscovita, andalucita, turmalina, que fueron emplazados entre 6.5Ma y 17Ma; del Mioceno inferior a superior (Sandeman, 1997).



Los intrusivos triásicos y terciarios forman parte del dominio magmático del arco interior de la cordillera oriental, la que ha tenido una evolución diferente al dominio magmático del arco principal de la Cordillera occidental (Clark, 1983).

2.2.1. Formación Sandia (Os-s)

Litológicamente consiste en pizarras, filitas y cuarcitas. Las pizarras se muestran fuertemente plegadas, fracturadas y con zonas alteradas, producto de la intrusión de dos cuerpos monzograníticos. Las pizarras y filitas son de color gris oscuro, con moscovita en los planos de foliación; parcialmente metamorfizadas a hornfels de aspecto masivo y de color gris oscuro a marrón. La Formación Sandia presenta intercalaciones de cuarcita gris blanquecina, de grano medio y compacto. En general, los estratos presentan rumbo E-W y buzamiento promedio 65° al S.

2.2.2. Formación Ananea (SD-a)

Esta unidad está compuesta generalmente de limoarcillitas pizarrosas, limonitas pizarrosas con algunas intercalaciones de areniscas cuarzosas, siendo posible encontrar pizarras micáceas de color gris oscuro a negro. Debido a su carácter pelítico, esta unidad da origen a formas suaves de colinas y cerros bajos. Los suelos que generan son de colores amarillentos a gris claros.

LAUBACHER, G. (1973) describió una secuencia gruesa de lutitas negras afectadas con esquistosidad de flujo, finamente estratificadas que afloran en la localidad de Ananea, en el valle, así como en la cordillera oriental descansando en aparente concordancia sobre la Formación Sandia. Se tienen secuencias similares en el sector NNW en la quebrada Huicsamani y en la quebrada Huarachani al NW del nevado San Francisco de Quenamari. Estos afloramientos son casi continuos con una dirección SSE-NNW prolongándose hacia Ñuñoa. Las limoarcillitas pizarrosas son de color gris oscuro



a negras, presentan marcada foliación paralela a la estratificación. En algunos niveles se encuentran nódulos de limoarcillitas, ferruginosas y calcáreos.

En varios niveles de la secuencia se han observado también limolitas laminadas gris oscuras. Debido a que la base de esta formación no se observa, no se puede determinar el grosor de la secuencia, sin embargo, por las exposiciones que existen, se puede inferir que debe tener un grosor mayor de 1000 m. Esta secuencia infrayace con una aparente concordancia al Grupo Ambo. Según los datos paleontológicos y sus relaciones estratigráficas se puede asignar a la Formación Ananea una edad que va del Silúrico hasta el Devoniano.

2.2.3. Grupo Ambo (Ci-a)

Los afloramientos del Grupo Ambo ocupan una considerable extensión y tienen una dirección NW-SE. Esta unidad genera un relieve de formas moderadas a abruptas, dependiendo de la estructura que este formando, cuando forma cuestras, los cerros son elevados con fuertes laderas escarpados (Newell, 1949).

Litológicamente se ha diferenciado dos secuencias, una inferior que consiste en una intercalación algo monótona de limoarcillitas con areniscas en una proporción de 2:1 aproximadamente. Las limoarcillitas contienen micas y se presentan laminadas en estratos de más de 1.00 m. de grosor. Las areniscas son de color gris blanquecino a gris, pudiendo llegar a ser de color beige, son de grano fino, gran parte de ellas son cuarzosas con alto contenido de moscovita, presentando laminación pronunciada, dando lugar a una fracturación en lajas, las capas son delgadas a medianas (0.10 m a 0.30 m). La secuencia superior está caracterizada por areniscas cuarzosas con niveles de limoarcillitas laminares. Las areniscas cuarzosas son de grano fino a medio, de color gris blanquecino, beige a gris, con excepción de aquellas areniscas que presentan bandas ferruginosas en la



que toma un color brunáceo, presenta además lamelas de moscovita. Los estratos varían entre 0.15 y 0.90 m. de grosor, algunas capas tienen laminación interna, las areniscas contienen estructuras de paleocorrientes, truncadas por otras capas subhorizontales y se encuentran alineadas lateralmente en un solo nivel, se interpreta como de origen fluvial. Se le asigna una edad correspondiente al Misisipiano (Carbonífero inferior).

2.2.4. Grupo Tarma (Cs-t)

Litológicamente consiste en una serie sedimentaria del Pensilvaniano (Carbonífero superior). Está constituida por areniscas feldespáticas de color blanquecino a verdoso con intercalaciones de calizas. En la parte superior la secuencia se compone de una intercalación de calizas (en parte micríticas) grises y rojizas, en capas medianas, y areniscas calcáreas. En la zona de Antauta las areniscas tienen cemento calcáreo de color rojizo y verde grisáceo, calizas de grano fino color violáceo, y areniscas calcáreas verdosas. Presenta una potencia aproximada de hasta 180 m. (INGEMMET, 1996).

El Grupo Tarma descansa concordantemente sobre el Grupo Ambo e infrayace con la misma relación al Grupo Copacabana y aflora en los alrededores de la localidad de Chulluni en el margen derecho del río Antauta. Otros afloramientos se tienen al noroeste y sureste de la mina San Rafael (Newell, 1949).

2.2.5. Grupo Copacabana (Pi-c)

El Grupo Copacabana principalmente está constituido por calizas y limoarcillitas calcáreas en capas gruesas, de color claro producto de la meteorización. Morfológicamente se distinguen por configurar relieves moderados a abruptos. Esta unidad aflora en el curso medio a inferior de las quebradas Chogñacota y Chuquisani. En general, ampliamente se distribuye al sureste y noreste de la mina San Rafael (Newell, 1949).



El espesor del Grupo Copacabana es variable teniendo grosores que pueden variar entre los 70 a 180 m. aproximadamente. Infrayace en algunas zonas en discordancia angular suave y en otras en concordancia a las areniscas rojas y volcánicas del Grupo Mitu.

2.2.6. Grupo Mitu (Ps-mi)

En el sur del Perú este grupo está bien desarrollado y ocupa una extensión considerable; en la hoja de Macusani tal unidad aflora formando franjas con una dirección NW-SE que se localiza mayormente en el sector del río Chullumayo (Newell, 1949).

El Grupo Mitu da origen a una topografía escarpada de relieve abrupto, con picos elevados y fuertes pendientes, ocasionalmente presenta gruesos farallones de paredes casi verticales. Esta unidad presenta un color de cobertura violácea a violáceo rojizo o rojo brunáceo, constituyendo así una buena guía para su identificación a distancia. En forma general la secuencia está compuesta por dos tipos de litofacies; una clástica y otra volcánica, pero no pueden separarse debido a la interdigitación de ambas. La unidad se inicia con una secuencia clástica que consiste en brechas sedimentarias con clastos de calizas micríticas, areniscas arcósicas rojas y areniscas cuarzosas con matriz areniscosa roja, en capas de 1.50 m.

La litofacie volcánica está constituida por lavas andesíticas de textura porfirítica, de naturaleza plagiofírica con fenocristales que pueden llegar a medir hasta 0.03 m. de largo, en una pasta micro a criptocristalina con una cantidad menor de feldespatos potásicos, cuarzo, piroxenos y anfíboles. Presenta algunas intercalaciones de brechas con litoclastos volcánicos y algunas pizarras. Raramente se encuentran areniscas arcósicas de grano fino, rojo brunáceos en capas de 0.60 m. o más. El magmatismo del Grupo Mitu pertenece a un magmatismo de arco interno.



El grosor de este grupo es de aproximadamente 1000 m. El Grupo Mitu esta sobreyaciendo con discordancia angular al Grupo Copacabana, relación que puede ser observada en el abra de Usicayos. Basándose en sus relaciones estratigráficas, su edad correspondería al Pérmico superior. Sin embargo, Kontak y otros (1986) obtuvo una edad Rb-Sr que varía entre 270Ma y 210 Ma.

2.2.7. Formación Huancané (Ki-hn)

En la zona de estudio aflora puntualmente al NE y SW de la hoja de Macusani. La Formación Huancané presenta morfología de formas abruptas con laderas empinadas. El grosor aproximado medido es de 200 m. La secuencia está constituida enteramente por areniscas cuarzosas en toda el área donde aflora, estas areniscas son de grano medio color blanco a blanco amarillento y muy raras veces rojo brunáceo (cuando contiene óxidos de hierro). También se pueden observar algunas intercalaciones delgadas de limoarcillitas grises, rojizas y verdosas. No se han encontrado fósiles en esta unidad, pero debido a su posición estratigráfica, al subyacer a la Formación Viluyo de edad albiana y sobreyacer a la Formación Muni se le asigna una edad Neocomiano (Cretácico Inferior) (Newell, 1949).

2.2.8. Depósitos Cuaternarios

Los materiales cuaternarios están principalmente representados por los depósitos fluviales, aluviales y coluviales. A continuación, la descripción de los tipos de materiales:

Depósitos Fluviales

Estos depósitos se encuentran ubicados en los fondos y riberas de los ríos. En el caso del área de estudio el principal depósito de este tipo se localiza a lo largo del río Crucero, donde está constituido por gravas gruesas y finas de diferente composición (polimícticas), arenas gruesas y finas, y depósitos limo-arcillosos (INGEMMET, 1996).



Depósitos Aluvial-Coluvial

Son aquellos depósitos que se acumulan en los flancos de los valles y quebradas tributarias, también se encuentran formando superficies subhorizontales, tales como las pampas Calapampa, Patanipampa, y Pacchani. Están constituidas por gravas polimícticas en una matriz arenosa. (INGEMMET, 1996).

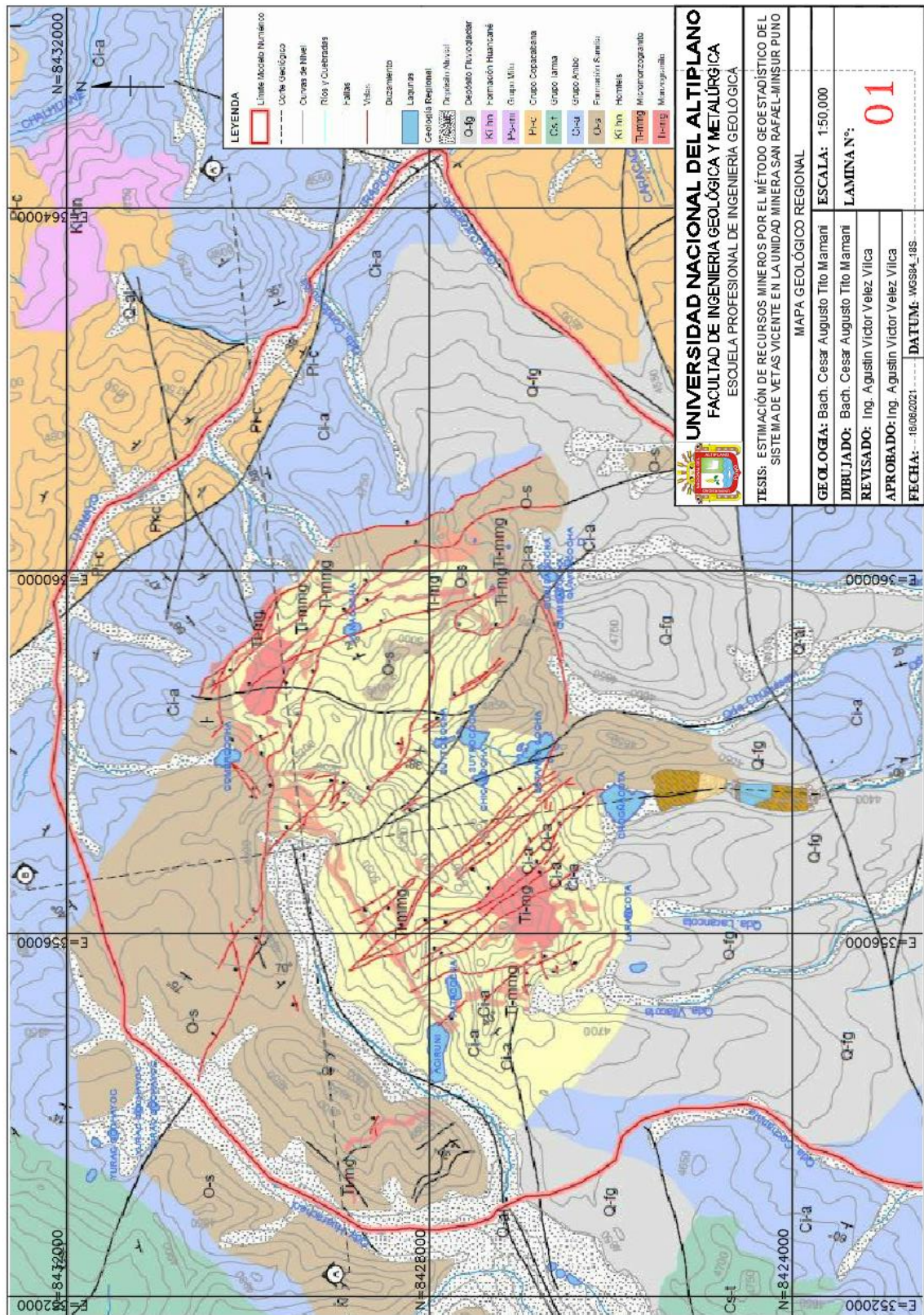


Figura 1: Mapa geológico regional del área de estudio.

Fuente: Balance de Aguas, elaborado por la consultora AMPHOS (AMPHOS 2014)

ERA/ETAPA/SISTEMA	SERIE	UNIDADES	Grosor (m)	COLUMNA	DESCRIPCION		
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	Deposito Fluviales		Arenas gravas y limo arcillitas		
			Deposito aluviales		Gravas y arenas de clastos polimicticos		
		Pleistoceno	Dep. Glaciar Fluviales		Gravas dubredondeadas en matriz areno-limosas		
			Deposito Maritimos		Gravas y arenas brechosas en matriz areniscosa		
	Neógeno	Formación Quenaman	Miembro Yapamayo	500		Tobas blancas grisáceas pobremente estratificadas con intercalaciones de tobas lapillíticas. Se caracterizan por su naturaleza riolítica	
			Miembro Chacacuziza	200		Tobas lapillítica bien estratificadas de naturaleza litoclastica generalmente riolítica	
	Paleógeno	Oligoceno	Formación Cayconi			Basaltos gris oscuros, muy esrosionados en capas poco definidas	
		Paleoceno	Grupo Puno	80		Conglomerado con matriz areniscosa oscura de clastos polimicticos intercalados con areniscas conglomerádicas.	
	MESOZOICA	Cretaceo	Superior	Formación Auzangate	400		Arenisca cuarzosa blanca con intercalaciones de areniscas lutáceas y limo arcillitas.
				Grupo Moho	Formación Hanchipacha		350
Formación Ayabacas					20		Caliza micriticas comun en contraria silicificada o con nodulos de chert
Formación Viluyo			<150		Arenisca cuarzosa rojiza con niveles de areniscas cuarzosas blancas y limo arcillitas.		
Inferior			Formación Huancane	<200	Arenisca cuarzosa blanca en capas gruesas niveles de arenisca cuarzosa rosácea y arenisca limosa roja.		
			Form. Muni	100	Limo arcillitas laminadas rojizas		
PALEOZOICA		Permiano	Superior	Grupo Mito	500		Lavas porfiriticas con grandes fenocristales de plagioclasas
	Inferior		Grupo Copacabana	300	Conglomerado polimictico, brechas y areniscas.		
	Carbonifero	Superior	Grupo Tarma	200	Caliza espática y micritica gris clara con niveles de dolomitas y calizas nodulares en la base, niveles fosiliferos		
		Inferior	Grupo Ambo	800	Areniscas calcareas blancas y rojizas con intercalaciones de areniscas verdes y calizas en la base y techo respectivamente.		
	Dev				Areniscas cuarzosas blancas y grisáceas con intercalaciones de limo arcillitas negras carbonosas y limo arcillitas violáceas. Algunos niveles de areniscas con estratificación sesgada		
	Ordov. Silur		Formación Ananea	> 1000	Pizarras, filitas, fuertemente deformadas, se encuentran numerosas vetillas de cuarzo.		
		Formación Sandia Grupo San Jose		Filitas grises oscuras con intercalaciones de cuarcitas Lutitas negruzcas con pequeñas intercalaciones de areniscas			

Figura 2: Columna estratigráfica generalizada del cuadrángulo de Macusani (INGEMMET, 1996).

2.2.9. Rocas ígneas

Dentro del cuadrángulo de Macusani se han cartografiado hasta cuatro tipos de rocas ígneas intrusivas:

- Plutones Graníticos
- Plutones Monzograníticos
- Intrusiones Riolíticas
- Intrusiones Basálticas



2.2.9.1. Plutones Graníticos

En la hoja de Macusani este tipo de intrusiones pertenecen al Paleozoico, dentro de las cuales destaca el plutón de Coasa, por su gran extensión.

a) Plutón de Coasa

Está ubicado al NE de la hoja de Macusani y se prolonga hacia el Norte y Este a los cuadrángulos vecinos de Ayapata, Esquena y Limbani. Se trata de un enorme cuerpo intrusivo de forma globular cortado por fallas de rumbo NE-SW, cubriendo una superficie de cerca de 800 Km², de la cual solo el 20% (165 Km²) de esta área corresponde al cuadrángulo de Macusani, se caracteriza por presentar una morfología abrupta y resaltante que forma parte de la cordillera oriental.

El cuerpo intrusivo es un granito porfídico con cristales grandes y pequeños de grano muy grueso a medio, es una roca leucocrata, holocristalina, inequigranular con grandes cristales de ortosa fuertemente maclada, que presentan estructura peritítica, de plagioclasa An_{10/15} a veces zonada. Se ha encontrado cuarzo xenomórfico. Las biotitas comúnmente se alteran a cloritas, presentando inclusiones de apatito y zircón. Los análisis químicos realizados muestran una relación de K₂O/Na₂O de alrededor de 1.2, mientras que el porcentaje de CaO es bajo. En las partes más externas del núcleo del intrusivo se han encontrado facies de monzogranito y también pegmatitas. Intruye a las areniscas del Grupo Ambo y a las pizarras de la Formación Ananea, produciendo un metamorfismo de contacto, que en el caso de las areniscas ha dado origen a cuarcitas con abundante piritita diseminada. En las series carbonatadas de los Grupos Tarma y Copacabana, el intrusivo forma skarn, donde se han localizado algunos cateos.

Dataciones posteriores realizadas por el método U/Pb sobre diferentes fracciones de zircón en una muestra tomada en el centro del batolito, dieron edades de un rango de



238 Ma.; que según Laubacher, ubicaría a la datación hecha por Stewart, como resultado de un rejuvenecimiento debido a la cataclasis, durante la fase andina.

b) Plutones Menores

Aproximadamente 6 Km al SW de Antauta en las inmediaciones de Occecunca se reporta la presencia de un intrusivo de 2.5 Km de largo por 1 Km de ancho, de forma alargada; pertenecería a un granito herciniano que se ha emplazado cortando al Grupo Ambo, por lo que se presume que su emplazamiento ocurrió después del Carbonífero inferior, no se ha encontrado evidencias de que haya afectado a las calizas del Grupo Copacabana (Laubacher, 1978).

En las cercanías al cruce de Antauta y Crucero en el cerro Pumani se encuentra un intrusivo félsico, de textura granular, muy alterado, en el que se aprecia una intensa argilización, tiene aproximadamente 1.5 Km y según sus relaciones de campo se le asocia al intrusivo de Occecunca. Sin embargo, la muestra recolectada dio más bien como resultado un cuerpo subvolcánico muy cuarzoso, el que podría tratarse de un microgranito de textura porfirítica, en el que destacan algunos fenocristales de cuarzo juntamente con fragmentos líticos y cristales, alterados a cloritas y sericitas en una matriz microgranular alotriomórfica de cuarzo. El cuerpo corta a las limoarcillitas gris oscuras de la Formación Ananea.

2.2.9.2. Plutones de Granodioritas y Monzogranitos

En el cuadrángulo de Macusani se encuentran dos cuerpos intrusivos del Cenozoico, el plutón de San Francisco de Quenamari y el plutón de Yurac Apacheta.

a) Plutón de San Francisco de Quenamari

Está ubicado a unos 25 Km al SE de Macusani. Conformar un cuerpo intrusivo de forma rectangular de 7 Km de largo con 4.5 Km de ancho, con un área aproximada de



más de 10 Km², constituyendo el núcleo del nevado San Francisco de Quenamari, que morfológicamente destaca como un macizo a modo de cono destruido, claramente observable en las imágenes de satélite. El plutón es una granodiorita, con facies de monzogranito porfirítico a los contornos, con megacrystales de feldespatos que alcanzan varios centímetros de longitud, sobre una pasta microgranular alotriomórfica de cuarzo y feldespato potásico. Se ha encontrado además cuarzo automorfo, feldespato corroído, biotita alterada a turmalina. Los análisis químicos de la roca revelan una gran abundancia de potasio en relación con el sodio, que indicaría un magmatismo ácido.

Corta directamente a las pizarras de la Formación Ananea y a las areniscas del Grupo Ambo, produciendo un metamorfismo en las rocas circundantes del tipo corneanas y cuarcitas, que se manifiestan por un cambio de color en las mismas, este plutón está asociado con la mineralización de estaño que se explota actualmente en la mina San Rafael. La presencia de cuarzo bipiramidal y de una mineralización estañífera, que en Bolivia esta datada en el Mioceno, sugiere indirectamente que la edad de la intrusión es también miocénica. Sin embargo, mediante dataciones efectuadas por (Clarck, 1983) y (Kontak, 1984), dieron valores entre 25.9 Ma - 22.6 Ma.; es decir en el límite del Oligoceno-Mioceno.

b) Plutón de Yurac Apacheta.

Comprende un cuerpo intrusivo ubicado a 6 Km al SE de la hacienda Cangallo, en la quebrada Coñicoto, afluente en la margen izquierda del río Crucero, y ubicado en el límite Sur del cuadrángulo, en el sector central este su mayor extensión corresponde a la hoja de Azángaro. Según la muestra recolectada, se trata de un monzogranito gris, con ligero tono parduzco y textura granular hipidiomórfica, en la cual destacan megacrystales



de feldespatos, que muestran alteraciones arcillosas y cloritosas. Se ha encontrado esfena reemplazando biotita.

El cuerpo intruye a los conglomerados del Grupo Puno, a las calizas del Grupo Copacabana y a las areniscas del Grupo Tarma, provocando una pobre alteración en las calizas silicificándolas o se encuentra asociada a mineralización de tipo hidrotermal, epitermal. (Laubacher, 1978), asigna este plutón a la fase andina afirmando que puede haberse emplazado durante el Mioceno.

2.2.9.3. Rocas Riolíticas

Comprende tres afloramientos de rocas félsicas ubicadas a más de 10 Km al Este de Macusani. Uno de ellos en el cerro Carcapata que tiene más de 4 Km de largo por 2 Km de ancho; otro en el cerro Mamajora a 5 Km del primero de 3 Km de largo por 1 Km de ancho, y otros dos cuerpos en los cerros Oquecunca en las inmediaciones del abra de Macusani. Corresponde a tobas de matriz afanítica con fragmentos subangulosos y subredondeados en la que se encuentran amígdalas rellenas por feldespatos y fragmentos de cuarzo, plagioclasa y biotita. Además, contiene fragmentos líticos subangulosos y subredondeados de origen ígneo con feldespatos potásicos y plagioclasas, así como fragmentos volcánicos de textura porfirítica, con moldes de fenos alterados a feldespatos y minerales opacos. Los cristales de plagioclasa y cuarzo presentan microfracturas rellenas por sericita y clorita, se encontraron además sílice en venillas y en microfracturas de fragmentos.

Los macizos distribuidos en tres afloramientos deben estar relacionados a apófisis que han cortado a las rocas del Grupo Mitu y a las calizas del Grupo Copacabana provocando un leve metamorfismo, estos cuerpos son mayormente lavas y tobas probablemente resultantes de flujos piroclásticos que sobreyacen a las rocas



preexistentes, sin embargo en el caso del cerro Carcapata se ha ubicado 1.5 Km al W un cuerpo intrusivo a modo de dique alargado de rumbo N 50° W que presenta disyunción columnar radial asociada con el cuerpo alargado que hace pensar que fue el alineamiento por donde salió el material que formó los cuerpos riolíticos indicados. En base a las dataciones realizadas mediante los métodos K – Ar. (Clark, 1990), les asignan edades de 20 Ma, es decir pertenecientes al Mioceno inferior.

En Llauchune en la margen izquierda del río Condoriri, al sur de la laguna Cerrera, en las inmediaciones del contacto Paleozoico – Cretácico se emplaza un cuerpo subvolcánico de naturaleza riolítica, caracterizado por una abundante presencia de biotita en grandes fenos de una pasta afanítica. El cuerpo corta a las areniscas de la Formación Muni, originando una aureola de metamorfismo relativamente comparable con la de San Francisco de Quenamari.

2.2.9.4. Rocas Basálticas

En el cerro Moro Moroni en las inmediaciones del poblado de Antauta, se señala el emplazamiento de rocas basálticas de naturaleza shoshonítica (Kontak, 1986), caracterizadas por fenocristales de olivino y ortopiroxenos aluminicos y cuarzo en megacristales. Se encuentra encima de los conglomerados del Grupo Mitu en forma de pseudocapas, por las que inicialmente fueron cartografiadas como parte del Mitu. (Newell, 1953), pero determinaciones posteriores mediante el método K-Ar (Kontak, 1983) dan como resultado una edad Neógena.

En Querichani al Sur de Ajoyani, y en la margen derecha del río del mismo nombre se encuentran unos basaltos gris oscuros afaníticos y de textura porfirítica y vesicular. La muestra evidencia inclusiones de vidrio en las plagioclasas, así como pseudomorfos de carbonatos, reemplazando a los clinopiroxenos. Se emplazan



aparentemente encima de las brechas sedimentarias, rojo violáceas del Grupo Mitu, por lo que inicialmente se pensó que eran lavas pertenecientes a dicho grupo, observando las relaciones de campo y el modo de emplazamiento de las capas se relaciona con los basaltos de Moro Moroni, se le asigna una edad miocénica.

En las cercanías del abra de Macusani, en las inmediaciones de Chullutiana, en la margen izquierda del río Ititamayo, se encontró una andesita basáltica, gris oscura, porosa de cavidades milimétricas, rellenas de carbonatos de textura porfirítica con escasos fenos de plagioclasas, las cuales se presentan macladas, microfracturadas y ligeramente alteradas a sericitas. Los carbonatos y cloritas intersticiales forman finas y cortas venillas. Su emplazamiento al igual que en el cerro Moro Moroni son en capas que inicialmente fueron confundidas como del Grupo Mitu, pero por relaciones de campo se les correlaciona con los basaltos de Moro Moroni.

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

De lo escrito en el boletín 79 del INGEMMET “Geología del Cuadrángulo de Macusani” (1996), se tiene reconocido cinco zonas estructurales cada una de ellas, poseen características particulares, lo que ha permitido diferenciarlas en:

2.3.1. Bloque de Putina

Esta zona estructural ha recibido diversos nombres como: Sinclinorium de Putina. Se le reconoce en el extremo SW y SE de la hoja de Macusani, a manera de una faja continua de 10 Km de ancho y 30 Km de largo; prolongándose hacia los cuadrángulos de Nuñoa y Azángaro. (Newell, 1949).

Dentro de las características principales de esta zona, se destaca la deformación de la secuencia sedimentaria mesozoica; la cual constituye un conjunto de rocas mayormente plásticas. Sus límites laterales lo conforman umbrales de rocas paleozoicas,



que condicionaron la paleogeografía de la cuenca Putina. Los pliegues que se observan dentro de esta estructura son de recorrido kilométrico y de flancos moderados a amplios, invirtiéndose en algunos casos tal como se observa en el río Condoriri cerca de Larimayo. La dirección de los pliegues es NW-SE manteniéndose constante hacia el cuadrángulo de Nuñoa. Las calizas de la Formación Ayavacas forman replegamientos disarmónicos debido a la incompetencia de las unidades infra y suprayacentes. Los anticlinales son mayormente apretados y en sus núcleos se exponen las Formaciones Huancané y Muni. Los sinclinales son amplios y en algunos casos se encuentran echados, siendo generalmente la Formación Ausangate la que se encuentra en el núcleo de tales estructuras.

Las fallas son en su mayoría de tipo transversal con alto ángulo de buzamiento, mostrando en algunos casos desplazamientos a lo largo del rumbo. No se observan fallamientos profundos importantes debido a la gruesa cobertura sedimentaria, pero se asume que debajo de la cobertura mesozoica se encuentran fallas profundas especialmente hacia los bordes de la cuenca. (INGEMMET. 1996).

2.3.2. Bloque de Quelhua-Gilata

Se denomina bloque Quelhua-Gilata a un macizo conformado por rocas paleozoicas, la cual se encuentra ocupando casi la tercera parte del cuadrángulo de Macusani, cuya prolongación abarca un área que va desde Ocongate hasta Putina.

Estructuralmente corresponde a la zona de mayor deformación cuyo sistema principal de fallamiento posee generalmente un rumbo andino (NW-SE), encontrándose desplazadas por fallas transversales de rumbo NE-SW y E-W. El primer sistema corresponde mayormente a fallas normales longitudinales de profundidad, que se encuentran afectando a la Formación Ananea. La segunda corresponde a la respuesta del



primer sistema de fallamiento. El comportamiento de las fallas ha estado controlado por la litología componente del macizo; siendo los Grupos Ambo, Tarma, Copacabana y Mitu los que han conformado un cuerpo rígido debido al grosor de la secuencia, parcialmente replegado y fallado. La Formación Ananea mayormente pelítica como nivel de despegue o intrazona se ha visto menguada debido a lo anterior.

La reactivación de algunas fallas longitudinales en profundidad es al parecer el control estructural más importante para el ascenso de los magmas que han dado lugar a las rocas ígneas cenozoicas que afloran en la hoja de Macusani, notándose cierto alineamiento de los afloramientos de cuerpos subvolcánicos y volcánicos. Los pliegues corresponden mayormente a anticlinales y sinclinales tumbados hacia el W o SW (mayoritariamente) y NE, sus flancos son bastante apretados y los rumbos de sus ejes son NW-SE y NE-SW, indicando una superposición de fases tectónicas. De acuerdo con las características de los pliegues observados, se puede afirmar que esta zona ha sufrido un acortamiento relativamente considerable durante la tectónica andina. (INGEMMET, 1996).

2.3.3. Bloque de Corani-Macusani

Se le encuentra al extremo NW del cuadrángulo de Macusani, constituyendo la prolongación distal de la zona estructural mayormente expuesta en los cuadrángulos de Corani y Nuñoa. Este bloque constituye una fosa tectónica limitada por grandes fallas profundas que alcanzan en el basamento a las pizarras de la formación Ananea, sobre la cual se encuentran los Grupos Ambo, Copacabana y Mitu. Esta fosa estructural se halla cubierta por rocas piroclásticas (tobas) ocultando estructuras pre-existentes.

En el cuadrángulo de Nuñoa este bloque se caracteriza por presentar un sistema de fallas normales de alto ángulo, con rumbo predominante E-W, disectado por fallas



transversales con rumbo NNE-SSW. Los límites de este bloque corresponden a fallas normales que la ponen en contacto con rocas paleozoicas. Se prolonga hacia el Este de Macusani conformando una extensa pampa (pampa Ccaluyo), la cual se encuentra cubierta por depósitos fluvioglaciares. Debajo de esta cobertura debe encontrarse el Grupo Mitu (INGEMMET, 1996).

2.3.4. Bloque de Carabaya

Esta zona estructural se ubica en el sector NE del cuadrángulo de Macusani, conformando una franja alargada de 30 Km de ancho y 50 Km de largo, con continuidad del afloramiento hacia las hojas de Limbani, Ollachea y Corani constituidas por rocas del Paleozoico. Estructuralmente se caracteriza por presentar un sistema de fallas inversas de alto ángulo, y pliegues echados que han afectado principalmente al Grupo Copacabana. Estas estructuras poseen una dirección NW-SE, sobre todo en el tramo del abra de Usicayos y Coasa; variando a E-W hacia el sector de los nevados de Querón y Vilajota, formando parte de la inflexión de Macusani. El buzamiento de las fallas y pliegues se encuentran orientadas hacia el Este y hacia el Norte (Laubacher, 1978).

En el abra de Coasa y Usicayos se observa una repetición sucesiva del Grupo Copacabana, debido a los pliegues echados que afectan a tal unidad. Estas fallas inversas se encuentran afectadas por pequeñas fallas transversales de rumbo NE-SW. El grado de acortamiento de esta zona es bastante considerable tomando en cuenta, además, que los pliegues que se encuentran son apretados y tumbados, siguiendo la misma dirección de las fallas inversas. Hacia la parte Norte y centro de la hoja de Macusani, se observa un cambio importante de la dirección de las fallas y pliegues variando de NW-SE a E-W, en las cuales predomina las fallas transversales; que visto en conjunto se encuentra bastante fracturada, fallada y plegada. Al parecer se debe a la reacción de la inflexión de las estructuras que se han producido al NE de Macusani.



Dentro de este bloque se ubica el plutón de Coasa el mismo que se encuentra afectado por la misma deformación que ha sufrido esta zona, observándose lineamientos con dirección NW-SE, similar a las fallas y pliegues. En el cuadrángulo Limbani una falla longitudinal de rumbo andino se encuentra afectando a este plutón. El ascenso del magma debió estar controlado por fallamientos preexistentes reactivados durante el permotriásico (INGEMMET, 1996).

2.3.5. Depresión de Crucero – Ananea

Morfológicamente conforma una extensa depresión somera, por la cual discurre el río Crucero con recorrido meandriforme; conformando una pequeña cuenca semicerrada la cual lentamente se está colmatando por sedimentos aluviales y fluvio-glaciares. Estructuralmente corresponde a una fosa tectónica al parecer afectada hacia sus límites por fallas normales, cuyo substrato debe estar conformado por rocas paleozoicas plegadas y falladas. Dentro de esta depresión se encuentran flujos piroclásticos, originados durante la fase distensiva.

Cerca de la Hacienda Cayconi sobre esta morfo-estructura se ha reconocido a las formaciones Huancané y Viluyo, constituyendo quizás en el Cretáceo inferior los límites distales de la cuenca Putina; para luego colapsar al reactivarse fallas normales preexistentes posiblemente en el paleógeno, quedando separado por bloques a manera de umbrales (INGEMMET, 1996).

2.4. METALOGENIA

Metalogénicamente, la mineralización de Sn-Cu-W está relacionada con stocks peraluminosos de “tipo S”, que varían de monzogranitos a granodioritas. Los granitoides forman parte de la Cordillera Real de Bolivia, las que están controladas por fallas del mismo nombre. Los stocks cortan a pizarras y cuarcitas del Ordovícico. El principal

depósito es San Rafael, pero destacan otros menores como Palca 11 y Santo Domingo. Las edades de mineralización están entre 25 y 22 Ma, sin embargo, en Bolivia, el depósito Cerro Rico de Potosí registra una edad más joven próxima a 14 Ma. (Zartman y Cunningham, 1995). Por otro lado, asociado a los eventos volcánicos de 25 y 14 Ma.; se tienen epitermales de Ag-Pb-Zn (Au) de intermedia a baja sulfuración, siendo el depósito más representativo el de Corani.

El depósito de Sn-Cu de San Rafael está situado en el flanco de la Cordillera de Carabaya es uno de los depósitos hidrotermales de Sn más grandes del mundo, con una ley promedio de 4.7%. La mena está constituida por casiterita en extensas vetas y sistemas de brechas ubicadas en niveles poco profundos de un stock de granodiorita que corta pizarras del Ordovícico (Arenas, 2000).



Figura 3: Cordillera Oriental, Franja Estannífera Perú-Bolivia-Argentina (Lehmann, 1979).

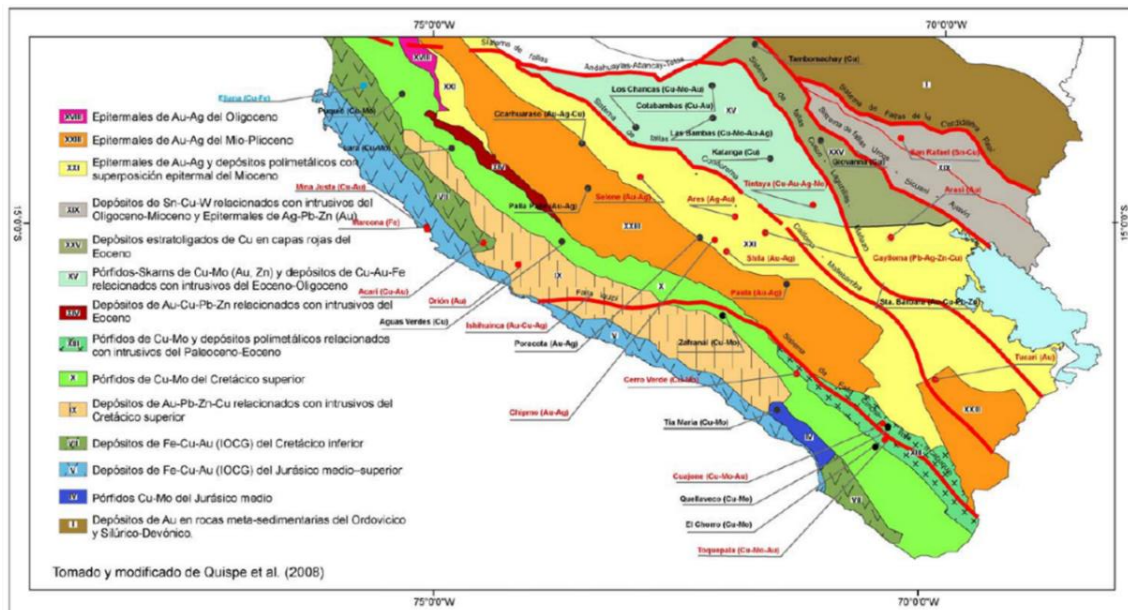


Figura 4: Mapa metalogénico del Perú, mostrando la franja XIX de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Oligoceno-Mioceno (INGEMMET).

2.5. MINERAL DE MENA, GANGA Y ESTÉRIL

2.5.1. Mineral de mena

Es el mineral, cuya explotación presenta interés, en general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento químico de interés (Cu de la calcopirita, Hg del cinabrio, Sn de la casiterita entre otros muchos más). Un mineral es mena de un metal cuando mediante la minería es posible extraer ese mineral de un yacimiento y luego mediante procesos metalúrgicos se obtiene el metal o el elemento químico de interés económico.

2.5.2. Mineral de ganga

Ganga es el material que se descarta al extraer la mena de un yacimiento de mineral, por carecer de valor económico o ser demasiado costoso su aprovechamiento. Es posible que un mineral que se considere ganga en un yacimiento sea de interés en otro, o que la mejora en las técnicas extractivas o los usos industriales haga rentable el procesamiento de materiales anteriormente considerados ganga. La ganga hace que la ley



del metal disminuya, por lo que es necesario separarla de la mena, como primera etapa en la concentración y obtención del metal.

2.5.3. Estéril

Corresponde a las rocas que no contienen mineral, o que disponen de este por debajo de la ley de corte. Este no se debe confundir con ganga, puesto que, son los minerales acompañantes de la mena.

2.6. CÓDIGO JORC

El código australiano para informar sobre Recursos Minerales y Reservas de Mena (el “Código JORC” o “el Código”), establece estándares mínimos, recomendaciones y normas para la información pública de resultados de exploraciones, Recursos Minerales y Reservas de Mena en Australia. Este ha sido redactado por el Comité Conjunto de Reservas de Mena de “The Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists y Minerals Council of Australia”. El Comité Conjunto de Reservas de Mena se constituyó en 1971 y publicó varios informes haciendo recomendaciones sobre la clasificación e Información Pública de Reservas de Mena antes de la primera divulgación del Código JORC en 1989.

El Instituto de Minería y Metalurgia de Australasia y el Instituto Australiano de Geocientíficos han adoptado el código y por lo tanto es obligatorio para los miembros de esas organizaciones. Es respaldado por el Consejo de Minerales de Australia y el Instituto de Valores de Australia como un aporte a las mejores prácticas. Las reglas para que las acciones sean cotizadas en la bolsa de valores de Australia y en la bolsa de valores de Nueva Zelanda incorporan el código.



El código ha sido adoptado por la bolsa de valores de Lima en mérito a la delegación de facultades conferidas por la Comisión Nacional Supervisora de Empresas y Valores (CONASEV) e incorporado en su lista de normas

Los principales principios que rigen la operación y aplicación del Código JORC son, transparencia, relevancia y competencia.

Transparencia. - Requiere que el lector de un Informe Público reciba suficiente información, cuya presentación sea clara y no ambigua, con el fin de entender el informe y no ser pervertido.

Relevancia. - Exige que el Informe público contenga toda la información relevante que los inversionistas y sus asesores profesionales podrían necesitar razonablemente, y razonablemente esperarían encontrar en el informe, con el fin de hacer un juicio razonado y equilibrado con respecto a la mineralización que se está informando.

Competencia. - Requiere que el Informe Público se base en trabajo que es de responsabilidad de una persona debidamente calificada y con experiencia que está sujeta y regida por un código de ética profesional que puede ser aplicado.

Las competencias y responsabilidades de acuerdo con las normas del código JORC este informe deberá ser elaborado por una persona competente y que es Miembro del Instituto australasiática de Minería y Metalurgia, o del Instituto Australiano de geólogos, o de una "organización reconocida profesional en el Extranjero" (Tinta, 2004).

2.6.1. Recursos

Son concentraciones de minerales que existen de manera natural en la corteza terrestre en forma, cantidad y calidad tales que la extracción económica de un producto, a partir de la concentración, sea actual o potencialmente factible. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral se conocen o estiman



o interpretan a partir de información, evidencias y conocimiento geológicos específicos, con alguna contribución de otras disciplinas.

Las declaraciones de Recursos Minerales generalmente son documentos dinámicos y cambiantes que se ven afectados por la tecnología, la infraestructura, los precios de metales y otros factores. Según cambien estos diversos factores, el material puede entrar o salir de la estimación de Recursos. Las partes de un yacimiento que no tengan perspectivas razonables de extracción económica eventual no deben incluirse en un Recurso Mineral.

Los Recursos Minerales se subdividen, en orden de confianza geológica creciente en las categorías de Inferido, Indicado y Medido.

En la Figura 5. se muestra la relación secuencial que existe entre la Información de Exploración, Recursos y Reservas. La clasificación de los estimados debe tomar este marco de referencia, de modo tal que reflejen los diferentes niveles de confianza geológica y los diferentes grados de evaluación técnica y económica. Conforme aumenta el conocimiento geológico, es posible que la Información de la Exploración llegue a ser lo suficiente como para estimar un Recurso Mineral. Conforme aumenta la información económica, es posible que parte del total de un Recurso Mineral se convierta en una Reserva Mineral. Las flechas de doble sentido entre Reservas y Recursos que se incluyen en la Figura 5 indican que los cambios en algunos factores podrían hacer que el material estimado se desplace de una categoría a otra (JORC, 1999).

La importancia relativa de los criterios sugeridos variará en cada yacimiento, dependiendo del ambiente geológico, restricciones técnicas, condiciones legales y normas existentes al momento de la evaluación.

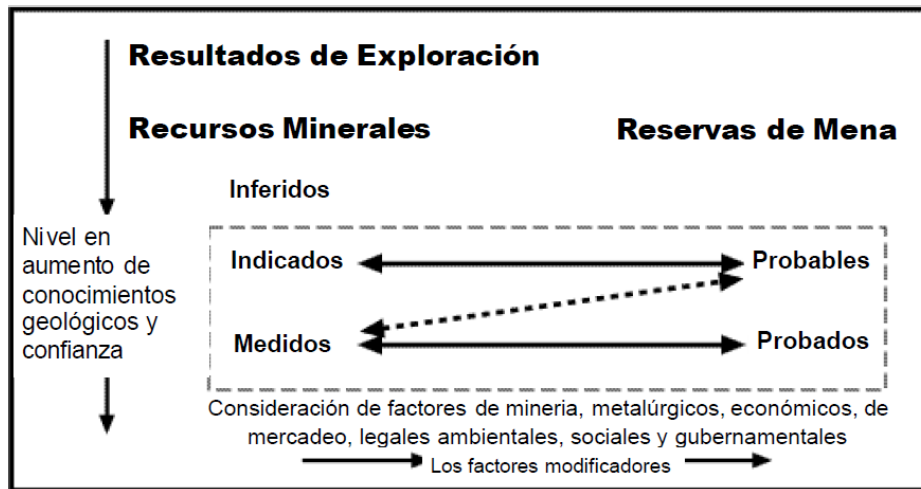


Figura 5: Relación general entre Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (Código de JORC, 1999).

Las principales definiciones que se debe asumir y se obliga a seguir están enunciadas en los párrafos siguientes.

A) Recurso mineral inferido

Parte de un recurso mineral cuyo tonelaje, leyes y contenido mineral pueden estimarse con un bajo nivel de confianza. Se le infiere o asume de evidencia geológica y/o de leyes asumidas, pero no verificadas. El estimado se basa en información reunida con técnicas adecuadas en lugares tales como afloramientos, trincheras, cateos, beneficios y taladros, la cual puede ser limitada o de calidad fiabilidad incierta (JORC, 1999).

Se asume la continuidad geológica y puede o no estar respaldada por muestras representativas o evidencia geológica. La confianza en el estimado es insuficiente como para aplicar parámetros técnicos y económicos, o realizar una evaluación económica de prefactibilidad que merezca darse a conocer al público.



B) Recurso mineral indicado

Parte de un recurso mineral cuyo tonelaje, densidades, forma, características físicas, leyes y contenido mineral pueden estimarse con un nivel de confianza razonable. El estimado se basa en la información de exploración, muestreo y pruebas reunidas con técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, trincheras, cateos, beneficios y taladros. Los lugares están demasiado o inadecuadamente espaciados para confirmar la continuidad geológica y de leyes, pero sí lo suficientemente cercanos como para asumirlas (JORC, 1999).

Se asume la continuidad geológica con muestras inadecuadamente espaciadas y que no permiten confirmar totalmente. La confianza en el estimado pese a ser menor que en el caso de los Recursos Medidos, es suficientemente alta como para aplicar los parámetros técnicos y económicos para una posible evaluación de prefactibilidad económica. El estimado se basa en información de la exploración, muestreo e información reunida mediante técnicas apropiadas sobre afloramientos, trincheras, pozos, taladros y pruebas de beneficio.

C) Recurso mineral medido

Parte de un recurso mineral cuyos tonelajes, densidades, forma, características físicas, leyes y contenido mineral pueden estimarse con un alto nivel de confianza. El estimado se basa en información confiable y detallada de exploración, muestreo y pruebas reunidas con técnicas adecuadas de lugares tales como los afloramientos, trincheras, piques, beneficios y taladros. Los lugares están espaciados con proximidad suficiente para confirmar la continuidad geológica y/o la de leyes (JORC, 1999).

Se confirma la continuidad geológica mediante muestreo adecuadamente espaciado.



La confianza en el grado de conocimiento de la geología y controles del yacimiento mineral es suficiente como para permitir la aplicación adecuada de los parámetros técnicos y económicos como para posibilitar una evaluación de viabilidad económica.

2.6.2. Reservas

Es la parte económica y legalmente extraíble de un Recurso Mineral Medido o Indicado y que incluye materiales de dilución y descuentos por las mermas que pueden ocurrir durante el minado. Requiere haber efectuado evaluaciones que pueden incluir estudios de prefactibilidad o factibilidad considerando los factores de minado, procesamiento, metalurgia, economía, mercadeo, legales, ambientales, sociales y gubernamentales asumidos en forma realista.

El término económico implica que se ha podido establecer o demostrar analíticamente que es posible una extracción o producción rentable, bajo hipótesis definidas de inversión. Las hipótesis deberán ser razonables, incluyendo los supuestos relacionados con los precios y costos que prevalecerán durante la vida del proyecto. La evaluación dinámica de las operaciones implica que un cálculo válido efectuado en un momento dado puede cambiar significativamente cuando se dispone de nueva información.

El término legalmente implica que no debería haber incertidumbre en lo que respecta a los permisos necesarios para el minado y el procesamiento de los minerales, ni tampoco con la resolución de asuntos legales que estuvieran pendientes. Se reconoce que las estimaciones de reservas, siendo estas predicciones de lo que ocurrirá en el futuro tendrán cierto grado de inexactitud. Se reconoce también que diferentes técnicos que pudieran analizar los mismos datos pueden llegar a interpretaciones y conclusiones



discrepantes. El hecho de que se demuestre, en una fecha posterior, que la estimación de una reserva fue inexacta debido a que no se contó con información suficiente o a que cambiaron las condiciones económicas, no significa necesariamente que la estimación se hizo de manera incompetente o fraudulenta. La información relacionada con la estimación de reservas debe tener una base sustentable y debe hacerse de buena fe.

En ciertas circunstancias, las reservas minerales previamente reportadas podrían revertir a recursos minerales. Su reclasificación no debe aplicarse cuando se prevé que los cambios serán temporales, de corta duración o cuando la Gerencia decide operar a corto plazo en forma no económica. Ejemplos de estas situaciones son la caída del precio del producto que se espera sea de corta duración, emergencia temporal en la mina, huelga de transportes, etc.

Se subdividen en orden de confianza creciente en Reservas Probables y Reservas Probadas.

A) Reserva mineral probable

Es la parte económicamente extraíble de un Recurso Mineral Indicado y en algunas circunstancias de un Recurso Mineral Medido. Esta Reserva incluye los materiales de dilución y los materiales por mermas que puedan ocurrir durante la explotación. Implica evaluaciones a nivel de un estudio de prefactibilidad o factibilidad con las consideraciones respecto a los factores económicos modificadores; estas evaluaciones demuestran que la extracción podría justificarse razonablemente en el momento del informe.

Una Reserva Mineral Probable tiene menos confianza que una Reserva Mineral Probada y su estimado debe tener la calidad suficiente como para servir de base a decisiones sobre compromisos mayores de capital y al desarrollo final del yacimiento.



Sin embargo, requiere mayor información para demostrar la continuidad geológica y su ley.

En ciertas circunstancias un Recurso Mineral Medido puede convertirse en Reserva Mineral Probable, debido a la incertidumbre asociada con los factores modificadores tomados en cuenta. Esta relación es indicada con línea punteada en la Figura 5 (en este caso no implica una reducción en el nivel de confianza o conocimiento geológico); en una situación así, los factores modificadores deberán explicarse fehacientemente (JORC, 1999).

B) Reserva mineral probada

Es la parte económicamente extraíble de un Recurso Mineral Medido e incluye los materiales de dilución y descuentos por mermas durante la explotación. La aplicación de la categoría de Reserva Mineral Probada implica el más alto grado de confianza en el estimado y se asume que existe suficiente información disponible para demostrar razonablemente la continuidad geológica y la ley.

Involucra efectuar evaluaciones de prefactibilidad o factibilidad en las que se consideran las modificaciones por factores realistas de minado, metalúrgicos, económicos, mercadeo, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones demuestran que la extracción es viable al momento del informe. Normalmente involucra al material que se está minando y para el cual hay un plan de mina detallado. En ningún caso los Recursos Minerales Indicados podrían convertirse directamente en Reservas Minerales Probadas (JORC, 1999).

Persona competente

En el caso estricto de la aplicación del código JORC en el Perú una Persona Calificada es un profesional que es miembro en ejercicio del colegio de Ingenieros del



Perú: Capitulo de Ingeniería de Minas o Capitulo de Ingeniería Geológica, con un mínimo de cinco años de experiencia relevante a la actividad que está desempeñando dicha persona y que este inscrita en el registro de Personas Calificadas de la bolsa de valores de Lima, si la Persona Calificada está efectuando una estimación o supervisando la estimación de recursos minerales, la experiencia relevante debe radicar en la estimación, calculo y evaluación de Recursos Minerales. Si la Persona Calificada está efectuando una estimación de Reservas de Mena, la experiencia relevante debe radicar en la estimación, calculo, evaluación y extracción económica de las Reservas de Mena.

2.7. CÓDIGO CANADIENSE NATIONAL INSTRUMENT NI 43-101

Este instrumento es una regla estándar a nivel internacional que se aplica a todas las declaraciones orales y la divulgación por escrito de información científica o técnica, incluida la divulgación de un recurso o reserva de minerales, realizada por o en nombre de un emisor con respecto a un proyecto mineral (CIM, 2001).

2.7.1. Definiciones

Verificación de datos: Significa el proceso de confirmación de que los datos se han generado con los procedimientos adecuados, se han transcrito con precisión de la fuente original y son adecuados para su uso.

Propiedad de desarrollo: Significa una propiedad que se está preparando para la producción mineral y para la cual se ha demostrado la viabilidad económica mediante un estudio de viabilidad.

Información: Significa cualquier declaración oral o revelación escrita hecha por o en nombre de un emisor y con la intención de ser, o razonablemente probable, puesta a disposición del público en una jurisdicción canadiense, ya sea presentada o no conforme a la legislación de valores, pero no incluye la divulgación por escrito que se pone a



disposición del público solo por el hecho de haber sido presentada ante un gobierno o agencia de gobierno de conformidad con un requisito de la ley que no sea la legislación sobre valores.

Información de exploración: Significa información geológica, geofísica, geoquímica, muestreo, perforación, pruebas analíticas, ensayos, mineralógica, metalúrgica y otra información similar relacionada con una propiedad particular que se deriva de actividades emprendidas para localizar, investigar, definir o delinear un prospecto mineral o depósito mineral.

Estudio de factibilidad: Significa un estudio exhaustivo de un depósito en el que todos los factores geológicos, de ingeniería, operativos, económicos y otros factores relevantes se consideran con suficiente detalle para que razonablemente pueda servir de base para una decisión final de una institución financiera para financiar el desarrollo del depósito para la producción mineral.

Proyecto minero: Significa cualquier actividad de exploración, desarrollo o producción con respecto a materiales orgánicos naturales, sólidos, inorgánicos o fosilizados, incluyendo metales básicos y preciosos, carbón y minerales industriales.

Asociación profesional: Significa una organización autorreguladora de ingenieros, geocientíficos o ambos ingenieros y geocientíficos que:

- a) Se le ha otorgado autoridad o reconocimiento por ley.
- b) Admite miembros principalmente sobre la base de sus calificaciones académicas y experiencia.
- c) Exige el cumplimiento de las normas profesionales de competencia y ética establecida por la organización



- d) Tiene poderes disciplinarios, incluido el poder de suspender o expulsar a miembros; y hasta el 1 de febrero de 2002 incluye una asociación de geocientíficos en Ontario y hasta el 1 de febrero de 2003 incluye una asociación de geocientíficos en una jurisdicción distinta de Ontario que no tenga un autorregulador legalmente reconocida asociación.

Informe técnico: significa un informe preparado, archivado y certificado de acuerdo con este Instrumento y el Informe Técnico del Formulario 43-101F1. (NI-43-101, 2001)

Cantidad: Significa tonelaje o volumen, dependiendo de qué término es el estándar en la industria minera para el tipo de mineral (CIM, 2001).

Persona calificada

- a) Es un ingeniero o geo científico con al menos cinco años de experiencia en exploración minera, desarrollo u operación minera o proyecto mineral evaluación, o cualquier combinación de estos.
- b) Tiene experiencia relevante al tema del proyecto mineral y el reporte técnico
- c) Es un miembro de buena reputación de una asociación profesional.

A) Recurso mineral

El Recurso Mineral es una concentración u ocurrencia de material natural, sólido, inorgánico, u orgánico fosilizado terrestre de tal forma, cantidad, y calidad que existe una razonable apreciación acerca de su potencial técnico-económico. La localización, tonelajes, contenidos, características geológicas, y el grado de continuidad de la mineralización es estimada, conocida, o interpretada a partir de específicas evidencias geológicas, metalúrgicas, y tecnológicas.



B) Reserva Mineral

La porción económicamente explotable de un recurso mineral medido o recurso mineral Indicado demostrado por al menos con un estudio de prefactibilidad. Este estudio debe incluir una adecuada información sobre la minería, procesamiento, metalurgia, factores económicos, y otros factores relevantes que demuestren, al momento de la presentación del informe, que la extracción económica puede ser justificada. Una reserva minera incluye materiales diluyentes y provisiones por pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es extraído.

2.7.2. Requisitos aplicables a la información

- Toda divulgación de información científica y técnica, incluida la divulgación de un recurso mineral o reserva mineral, relativa a un proyecto de mineral, debe basarse en la información preparada por o bajo la supervisión de una persona calificada.
- Prescribe la terminología que se utiliza para describir varias características tanto geológicas como financieras, en el informe.
- Determina el tipo de información que se ha discutido y los datos técnicos que deben ser retratado, por diversos niveles de información.
- Prescribe una lista de personas competentes autorizadas, y la definición de los grupos y asociaciones que pueden calificar para certificar a una persona como Calificada.

El emisor se asegurará de que toda divulgación de naturaleza científica o técnica, incluida la divulgación de un recurso mineral o reserva mineral, relacionada con proyectos minerales sobre un material de propiedad para el emisor, se base en un informe técnico u otra información preparada por o bajo la supervisión de una persona calificada



El emisor se asegurará de que cualquier divulgación de un recurso mineral o reserva mineral, incluida la divulgación en un informe técnico presentado por un emisor:

- a) Utiliza solo las categorías aplicables de recursos minerales y reservas minerales establecidas.
- b) Informa cada categoría de recursos minerales y reservas minerales por separado, y si se divulgan tanto los recursos minerales como las reservas minerales, se indica en qué medida, en su caso, se incluyen las reservas minerales en los recursos minerales totales;
- c) No agrega recursos minerales inferidos a las otras categorías de recursos minerales.

El emisor no hará ninguna divulgación de:

- a) La cantidad o el grado de un depósito que no se ha clasificado como un recurso mineral inferido, un recurso mineral indicado, un recurso mineral medido, una reserva mineral probable o una reserva mineral probada.
- b) Resultados de una evaluación económica que utiliza recursos minerales inferidos

2.7.3. Comparación con el código JORC

Ambo códigos en general son similares, la principal diferencia entre ambos es el contenido del informe que siguen ambas normas. En el Instrumento Nacional NI 43-101 los informes elaborados por personas calificadas son mucho más técnicos en lo económico debido a que se deben especificar los valores, mientras que en el código JORC solo se especifican los estados y las cantidades de un recurso mineral.

2.8. ESTIMACIÓN DE RECURSOS

La existencia de depósitos minerales de leyes cada vez más marginales y la tarea cada vez más difícil de descubrir nuevos depósitos minerales, hacen imprescindible la

aplicación de técnicas conducentes al mejor aprovechamiento de los recursos. La geoestadística (técnica del Krigado o Kriging) es una de estas técnicas que está mejor sustentada por la formación y conclusión de carácter analítico que la respaldan y le permiten una mejor interpretación del recurso natural (Altamirano, 1996).

Durante las etapas iniciales de exploración se produce una gran cantidad de datos (por ejemplo, de leyes y espesores); aunque esta información está distribuida en todo el depósito representa un volumen muy pequeño respecto a él; por lo tanto, para la estimación de recursos/reservas (etapa final de la exploración) habrá amplios sectores para los cuales habrá que predecir o estimar el valor de la variable.

Utilizando como ejemplo la variable ley, la estimación puede definirse como: asignar un valor a un punto o a un bloque que no posee información, a partir de la información de las muestras cercanas. Entonces la estimación no es la realidad sino una aproximación a la realidad que dependerá de factores tales como: el conocimiento geológico del depósito, la complejidad de la distribución de las leyes y la localización y cantidad de muestras utilizadas para la estimación. Debe mencionarse que todos los métodos que se tratarán consisten en combinaciones lineales ponderadas, con la siguiente ecuación general

$$\text{estimador} = v_e = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i$$

donde v_e es el valor estimado, v_i son los valores individuales de las muestras y w_i son los ponderadores para cada una de ellas. En la mayor parte de los métodos de estimación y a los efectos de evitar el sesgo, los ponderadores deben sumar 1.

$$\sum w_i = 1$$



Este punto inicia con una breve síntesis de las técnicas de estimación clásicas utilizadas en minería y, posteriormente se pasa a describir el método geoestadístico de estimación denominado: kriging.

2.9. MÉTODOS TRADICIONALES DE ESTIMACIÓN

Los métodos tradicionales de estimación de recursos mineros, fueron utilizados durante decenas de años con éxito, sin embargo el agotamiento de los depósitos de altas leyes, la nueva tendencia de explotación de grandes depósitos que contienen leyes bajas casi colindando con leyes marginales, ha requerido la implementación de modernas tecnologías de tratamiento metalúrgico y con ello una mayor sofisticación para la estimación de leyes de recursos y reservas, en nuevos proyectos mineros y en minas en operación.

Sin embargo, hay que reconocer que los métodos tradicionales aun proporcionan valores de estimación, cercanos a la realidad, sujetos de credibilidad y confianza para depósitos de minerales bondadosos en sus valores de ley y tonelaje, que a simple vista garantizan una rentabilidad del retorno satisfactorio de la inversión. Sin embargo, no se puede decir lo mismo para depósitos con leyes y tonelajes no muy atractivos, que presenta una rentabilidad marginal a la inversión.

La estimación de recursos mineros se puede dividir en dos partes: a) Estimación global: interesa estimar la ley media y el tonelaje de todo el yacimiento (o de una zona grande S dentro del depósito o yacimiento) y b) Estimación local: Interesa estimar la ley media de unidades o bloques dentro de S , con el fin de localizar las zonas ricas y pobres dentro de esta zona S .

A continuación, se realizará una revisión de los métodos tradicionales

a) Método de la media aritmética

El método de la media aritmética se basa en lo siguiente: Para estimar la ley media de un conjunto S se promedian las leyes de los datos que están dentro de S .

Ejemplo: Consideremos el caso de un cuadrado con 7 muestras interiores:

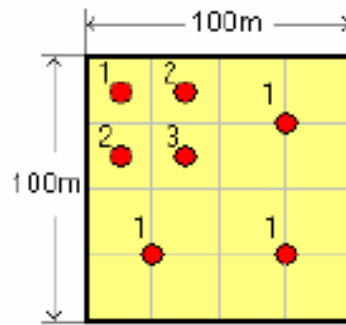


Figura 6: Ejemplo bidimensional. Existe una agrupación de datos (Alfaro, 2007).

$$\hat{z}_S = \frac{1+1+1+3+2+2+1}{7} = \frac{11}{7} = 1.57$$

La fórmula general es:

$$\hat{z}_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$$

Comentarios acerca del método:

- Todos los datos tienen el mismo peso $1/N$
- Muy simple. Fácil de calcular.
- Produce malos resultados cuando hay agrupaciones de datos. En el ejemplo de la figura anterior existe una agrupación de datos en la zona de alta ley: El valor 1.57 aparece como demasiado alto.
- No funciona bien en estimaciones locales porque quedan bloques sin información.

b) Método de polígonos

El método de los polígonos se basa en lo siguiente: Asignar a cada punto del espacio la ley del dato más próximo. Para estimar una zona S se ponderan las leyes de los datos por el área (o volumen) de influencia S_i .

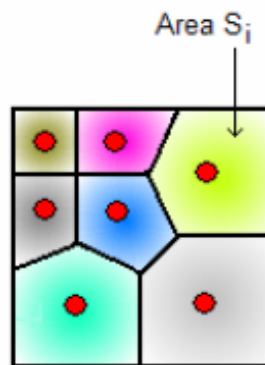


Figura 7: Método de los polígonos (Alfaro, 2007).

Ejemplo: En el mismo caso anterior se tiene:

$$\hat{z}_S = 1.36$$

La fórmula general es:

$$\hat{z}_S = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N S_i z_i \quad (S = S_1 + S_2 + \dots + S_N)$$

Comentarios acerca del método:

- Complicado, requiere compás, regla, planímetro.
- El peso del dato Z_i es S_i / S .
- Funciona mejor con agrupaciones de datos que la media aritmética.
- Difícil de implementar en tres dimensiones.
- En general no es adecuado en estimaciones locales porque asigna la misma ley a todos los bloques que están dentro de un mismo polígono. Produce problemas con datos anómalos.

c) Método de los triángulos

Elimina las discontinuidades entre las muestras adyacentes y utiliza para la estimación 3 muestras que constituyen los vértices del triángulo (Fig. 8); z es el valor (ley) de las muestras por lo que el triángulo es un plano inclinado y para cualquier punto dentro de él puede estimarse su valor resolviendo las ecuaciones del plano, cuya formula general es:

$$z_i = ax_i + by_i + c$$

donde z_i es el valor de cada muestra, x_i , y_i son sus coordenadas, y a , b y c son los coeficientes con los cuales se obtiene el valor del estimador.

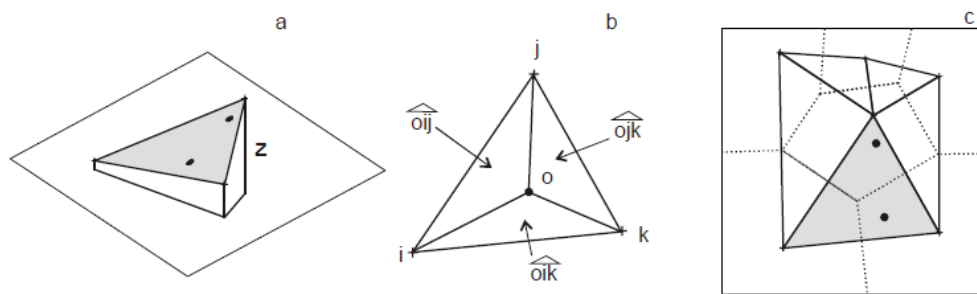


Figura 8: a) El triángulo en cuyos vértices están las muestras es un plano inclinado. b) método geométrico para obtener el estimador. c) construcción de los triángulos de Delaunay. Los círculos negros representan algún punto que se desea estimar dentro del triángulo (Fernández y Tessone, 2015).

También puede obtenerse el estimador (ve_o) de cualquier punto en forma geométrica, usando como ponderador de la muestra del vértice la superficie del triángulo interno opuesto, que tendrá como vértices dos muestras y el punto a estimar; por ejemplo, en la Figura 8b el estimador del punto o , es:

$$ve_o = \frac{ojk * v_i + oik * v_j + oij * v_k}{ijk}$$

Este método dependerá de cuáles son los tres puntos cercanos por utilizar para definir el plano. Una técnica para construir los triángulos es la llamada “triangulación de Delaunay” (Figura. 8c) que está relacionada geoméricamente con los polígonos: tres muestras formarán un triángulo si sus polígonos de influencia tienen un vértice en común.

d) Método del vecino más cercano

Se asigna al bloque el valor de la muestra “más cercana”, donde “más cercana” se define como una distancia transformada o anisotrópica que tiene en cuenta cualquier anisotropía espacial. No implica la ponderación de los valores de muestra, por lo que se puede estimar un campo numérico o un campo alfanumérico.

e) Método del inverso de la distancia

Su objetivo es otorgar un ponderador mayor a las muestras más cercanas y uno menor a las más alejadas. Un esquema simple se brinda en la Figura 9.

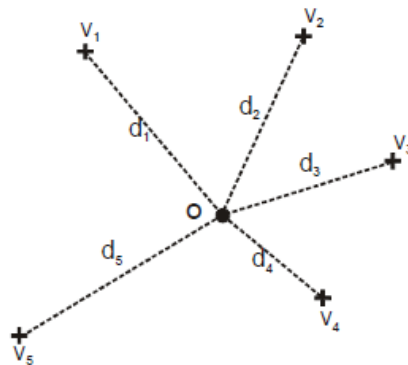


Figura 9: Distancias (d_i) entre las muestras (+) y el punto a estimar (o) (círculo negro); v_i son los valores de las muestras (Fernández y Tessone, 2015).

El estimador (ve) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$ve_o = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} * v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}$$

donde d_i son las distancias entre la localización de cada muestra y el punto a estimar, v_i son los valores (ley) de las muestras y ve_o es el estimador del punto a estimar.

Este método permite una amplia gama de estimadores si a la distancia (d_i) la elevamos a alguna potencia (p); de esta forma la ecuación previa se hace:

$$ve_o = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} * v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

La potencia puede variar ($p < 1$ a $p > 1$) dependiendo que peso se quiere otorgar a las distancias. Si $p < 1$ (por ejemplo 0,2) la distancia será un ponderador de poca importancia y nos estaríamos acercando a un simple promedio de las muestras. Si $p > 1$ es muy elevado (por ejemplo 10) las muestras alejadas tendrían un ponderador muy pequeño y tal vez casi todo el peso lo puede tener la muestra más cercana; así el método sería muy similar al de los polígonos, donde el estimador utiliza sólo la muestra más cercana. La elección de la potencia p es arbitraria, pero es tradicional $p=2$; esto es la inversa de las distancias al cuadrado.

Comentarios acerca del método:

- Simple, fácil de calcular.
- Se adapta mejor en estimaciones locales que globales.
- No funciona bien con agrupaciones de datos.
- Atribuye demasiado peso a las muestras cercanas al centro de gravedad. En particular no está definido si $di = 0$.

Crítica general de los métodos tradicionales de estimación de leyes

De las presentaciones anteriores podemos hacer los comentarios siguientes sobre los métodos estudiados:



- Son empíricos.
- Demasiado geométricos.
- No consideran la estructura del fenómeno mineralizado (anisotropía o isotropía).
- En general estos métodos presentan un fenómeno conocido como sesgo condicional, el cual se traduce en la práctica por una sobre estimación de las leyes altas y una subestimación de las leyes bajas.
- Estos métodos tradicionales, no son eficientes para grandes proyectos pues su imprecisión lleva a altos sobrecostos de explotación y no maximizan el aprovechamiento geológico.

2.10. MÉTODO GEOESTADÍSTICO

La Geoestadística es la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de los depósitos mineros (con todas las aproximaciones que esto implica). De manera general, diremos que un fenómeno es regionalizado cuando se desplaza en el “espacio”, manifestando una cierta estructura. Las ciencias de la tierra, entre otras, nos proporcionan numerosos ejemplos. Si $f(x)$ designa el valor en el punto x de una característica f de este fenómeno, diremos que $f(x)$ es una variable regionalizada, abreviado, una V.R. Se trata de un término neutro, descriptivo, anterior, en particular a toda interpretación probabilística (Matheron, 1969).

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel & Huijbregts, 1978).

En términos mineros se define la geoestadística como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de los recursos mineros (Alfaro, 2007).

Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones



de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks & Srivastava, 1989).

Cualquier disciplina que trabaja con datos colectados en diferentes locaciones espaciales necesita desarrollar modelos que indiquen cuando hay dependencia entre las medidas de los diferentes sitios. Cuando el objetivo es hacer predicción, la geoestadística opera básicamente en dos etapas. La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica kriging. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo.

2.10.1. Método del kriging ordinario

El Kriging es una técnica de estimación (o predicción) de valores en puntos o volúmenes, cuyo valor se desconoce; se basa en las muestras vecinas, su ubicación y la variabilidad espacial de la distribución que surge del variograma. La metodología de kriging también es de combinaciones lineales ponderadas y permite obtener tanto el estimador como el error de esa estimación. Actualmente es un método muy usado en las estimaciones y definiciones de recursos/reservas en minería, pero también se utiliza en problemas de contaminación de aguas y suelos, estimaciones en reservorios de petróleo, propiedades geotécnicas de suelos, etc.

Krige, ingeniero de minas de larga trayectoria en los yacimientos de oro de Witwatersrand (Sudáfrica) reconoció la importancia de la variabilidad espacial de los resultados de muestras de esos yacimientos; fue quien comenzó a utilizar los datos de muestras internas y externas al volumen de mena a evaluar, con el fin de obtener mayor

seguridad en las leyes medias que se asignan a ese volumen. La metodología fue luego formalizada matemáticamente en Francia con la teoría de las variables regionalizadas de Matheron, quien acuñó el término Kriging (Krigeage en francés).

El Kriging es un método que permite obtener los ponderadores que se aplicarán a cada muestra para estimar el valor de un punto o bloque de valor desconocido y la varianza (o error) que se produce en dicha estimación. El método utiliza los datos de valores de muestras conocidas de su entorno (o internas al bloque), pero emplea no sólo sus valores numéricos sino también su arreglo espacial, el cual debe definirse previamente mediante la construcción del variograma experimental y su ajuste a un modelo de variograma. Por la experiencia en la evaluación de depósitos minerales, el kriging parece representar mejor los datos reales respecto a otros estimadores (inversa de las distancias, polígonos, triángulos, etc.).

En algunos textos el Kriging ha sido calificado con las siglas B.L.U.E (del inglés: Best Linear Unbiased Estimator = el mejor estimador lineal no sesgado). El término “estimador lineal” es porque es el resultado de combinaciones lineales ponderadas de los datos disponibles. “No sesgado” se debe a que produce datos estimados en donde la media de los errores (residual) es igual a cero. “El mejor” es como consecuencia que minimiza la varianza del error. El Kriging, por lo tanto, tiende a eliminar los defectos de subestimación y los excesos de sobre estimación que presentan los métodos clásicos de estimación de recursos en minería.

En la literatura geoestadística pueden encontrarse diversos tipos de Kriging: Kriging Ordinario (KO), Kriging Simple (KS), Kriging Indicador (KI), Co-Kriging, entre otros, que pueden ser tanto de puntos como de bloques. Si bien cada uno posee algunas variantes en los datos de partida, los métodos son esencialmente iguales en cuanto a las

operaciones y manejo de ellos. El método se comprenderá a partir de la síntesis del desarrollo de un kriging ordinario que se tratará a continuación.

Kriging Ordinario

Como se señaló el objetivo del kriging es obtener los ponderadores de las muestras que usaremos para estimar el valor de un punto o bloque de valor desconocido y establecer el error de dicha estimación. Recordemos que los métodos típicos de estimación en la mayor parte de las situaciones geológicas y mineras son combinaciones lineales ponderadas del tipo:

$$v_e = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i$$

donde v_e es el valor estimado, v_i son los valores individuales de las muestras y w_i son los ponderadores para cada una de ellas. En la mayor parte de los métodos de estimación y a los efectos de evitar el sesgo, los ponderadores deben sumar 1:

$$\sum w_i = 1$$

En el Kriging se habla de vecindad cuando se conservan todos los datos, en algunos casos son afectados por un ponderador Kriging cuando un dato muy lejano no aporta demasiada información a la zona de estimación.

La vecindad donde se realiza la estimación Kriging se realiza sobre una vecindad móvil, este proceso busca realizar estimaciones sobre todos los nodos de una grilla que cubre el bloque, para este propósito se deben definir la forma y tamaño de la vecindad los que estarán en función del variograma, anisotropía de la variable y los datos disponibles.

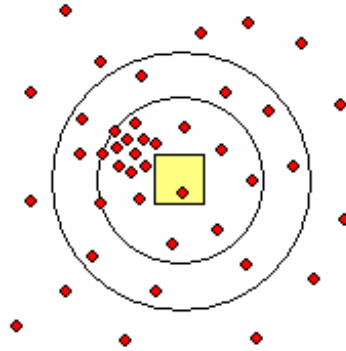


Figura 10: Vecindad de estimación (Alfaro, 2007).

2.10.2. Teoría de las variables regionalizadas

Una variable regionalizada es una función que representa la variación en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural (Alfaro, 2007), por ejemplo:

- La ley de un mineral, la potencia de una veta, la acumulación, la densidad de la roca o la recuperación metalúrgica, describen un fenómeno de mineralización.
- La porosidad y la permeabilidad de la roca en un reservorio de petróleo o en un acuífero.
- La concentración de un elemento contaminante en la atmósfera o en el suelo.
- La altitud topográfica en un punto del espacio geográfico.
- La conductividad eléctrica, el pH y la concentración de nutrientes medidas sobre una muestra de suelo.
- El número de árboles y su diámetro promedio en áreas de observación de un bosque.

Dado que un fenómeno regionalizado nunca posee una extensión infinita, estudiaremos la variable regionalizada sólo dentro de un dominio limitado “D” llamado campo de la variable. Este campo puede representar una zona natural, fuera de la cual la

variable no está definida. Puede tratarse también de un dominio particular, donde la variable interesa, por ejemplo, los sitios donde no se anula o donde es mayor que un límite de detección.

La superficie o el volumen sobre el cual se considera la variable regionalizada se denomina soporte, a menudo el soporte es un cilindro llamado testigo, (ver figura 11).

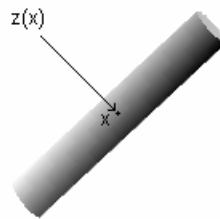


Figura 11: Un testigo, tiene un cierto largo L y un cierto diámetro D . (Alfaro, 2007).

2.11. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

El Análisis Exploratorio de Datos es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. El estudio exploratorio proporciona métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recogida de los mismos, tratamiento y evaluación de datos ausentes (missing), identificación de casos atípicos (outliers).

2.11.1. Medidas de centralización, dispersión y forma

Medidas de centralización

Entre las medidas características de una distribución destacan las llamadas medidas de centralización, que nos indicaran el valor promedio de los datos, o en torno a que valor se distribuyen estos como son: media aritmética, mediana y la moda.

Media aritmética (\bar{x}). - Supongamos que tenemos una muestra de tamaño N , donde la variable estadística x toma los valores: x_1, x_2, \dots, x_N . Se define la media aritmética \bar{x} , o simplemente media, de la muestra como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}.$$

Es decir, la media se calcula sencillamente sumando los distintos valores de x y dividiendo por el número de datos. En el caso de que los diferentes valores de x aparezcan repetidos, tomando entonces los valores x_1, x_2, \dots, x_k , con frecuencias absolutas n_1, n_2, \dots, n_k , la media se determina como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{N}$$

Siendo: $x_i = \text{valor observado}$

$N = \text{total de muestras}$

Mediana (M_e). - Una medida de centralización importante es la mediana M_e . Se define esta como una medida central tal que, con los datos ordenados de menor a mayor, el 50% de los datos son inferiores a su valor y el 50% de los datos tienen valores superiores. Es decir, la mediana divide en dos partes iguales la distribución de frecuencias o gráficamente, divide el histograma en dos partes de áreas iguales.

Moda (M_o). - Se define la moda M_o de una muestra como aquel valor de la variable que tiene una frecuencia máxima. En otras palabras, es el valor que más se repite. Hay que indicar que puede suceder que la moda no sea única, es decir que aparezcan varios máximos en la distribución de frecuencias. En ese caso diremos que tenemos una distribución bimodal, trimodal, etc.

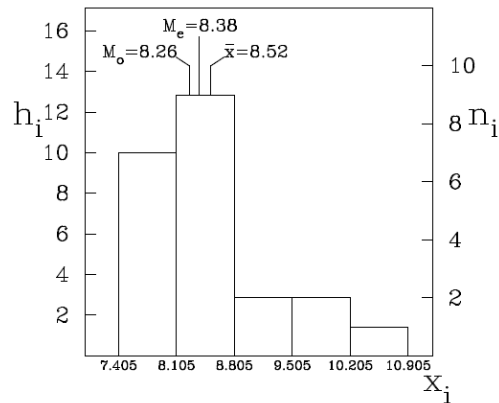


Figura 12: Localización de la media, mediana y moda (Gorgas, Cardiel y Zamora, 2011).

Medidas de dispersión

Las medidas de centralización vistas anteriormente reducen la información recogida de la muestra a un solo valor. Sin embargo, dicho valor central, o medio, será más o menos representativo de los valores de la muestra dependiendo de la dispersión que las medidas individuales tengan respecto a dicho centro. Para analizar la representatividad de las medidas de centralización se definen las llamadas medidas de dispersión. Estas nos indicaran la variabilidad de los datos en torno a su valor promedio, es decir si se encuentran muy o poco esparcidos en torno a su centro. Se pueden definir entonces, diversas medidas de desviación o dispersión, siendo estas fundamentales para la descripción estadística de la muestra

Varianza. - Sin lugar a duda la medida más usada para estimar la dispersión de los datos es la desviación típica. Esta es especialmente aconsejable cuando se usa la media aritmética como medida de tendencia central. Al igual que la desviación media, está basada en un valor promedio de las desviaciones respecto a la media. En este caso, en vez de tomar valores absolutos de las desviaciones, para evitar así que se compensen desviaciones positivas y negativas, se usan los cuadrados de las desviaciones. Esto hace además que los datos con desviaciones grandes influyan mucho en el resultado final. Se define entonces la varianza de una muestra con datos repetidos como:



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

Siendo:

\bar{x} = Media aritmética

x_i = Valor observado

n = Total de muestras

Desviación estándar. - Es la raíz cuadrada de la varianza. Es una medida de mayor practicidad debido a que se encuentra en las mismas unidades de medida que la variable.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Coefficiente de variación. - Un problema que plantean las medidas de dispersión vistas es que vienen expresadas en las unidades en que se ha medido la variable. Es decir, son medidas absolutas y con el único dato de su valor no es posible decir si tenemos una dispersión importante o no. Para solucionar esto, se definen unas medidas de dispersión relativas, independientes de las unidades usadas. Estas dispersiones relativas van a permitir además comparar la dispersión entre diferentes muestras (con unidades diferentes). Entre estas medidas hay que destacar el coeficiente de variación de Pearson, definido como el cociente entre la desviación típica y la media aritmética.

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

y en porcentaje como: $100CV = 100(S/X)\%$ Proporciona una comparación entre la variación de grandes valores y la variación de pequeños valores.

Las técnicas de Geoestadística Lineal producen buenos resultados cuando el coeficiente de variación es menor que uno, $CV < 1$. Para $CV > 1$ se recomiendan técnicas Geoestadísticas no lineal.

Medidas de forma

La descripción estadística de una muestra de datos no concluye con el cálculo de su tendencia central y su dispersión. Para dar una descripción completa es necesario estudiar también el grado de simetría de los datos respecto a su medida central y la concentración de los datos alrededor de dicho valor.

Coefficientes de asimetría. - Se dice que una distribución de medidas es simétrica cuando valores de la variable equidistantes, a uno y otro lado, del valor central tienen la misma frecuencia. Es decir, en este caso tendremos simetría en el histograma (o en el diagrama de barras) alrededor de una vertical trazada por el punto central. En el caso de una distribución perfectamente simétrica los valores de media aritmética, mediana y moda coinciden ($\bar{x} = Me = Mo$). En el caso de no tener simetría, diremos que tenemos asimetría a la derecha (o positiva) o a la izquierda (o negativa) dependiendo de que el histograma muestre una cola de medidas hacia valores altos o bajos de la variable respectivamente. También se puede decir que la distribución está sesgada a la derecha (sesgo positivo) o a la izquierda (sesgo negativo). En el caso de una distribución asimétrica, la media, mediana y moda no coinciden, siendo $\bar{x} > Me > Mo$ para una asimetría positiva y $\bar{x} < Me < Mo$ para una asimetría negativa.

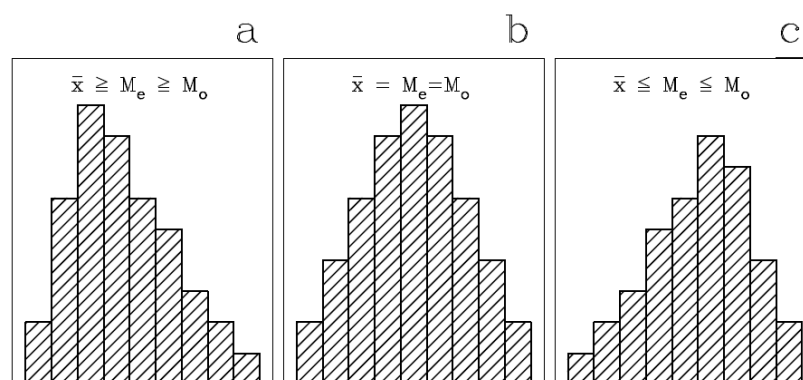


Figura 13: Distribución con asimetría hacia la derecha, positiva, (panel a), simétrica (panel b) y con asimetría hacia la izquierda, negativa (panel c) (Gorgas, Cardiel y Zamora, 2011).

2.11.2. Distribución de frecuencias

Una distribución de frecuencias es una disposición de datos agrupados en intervalos de clase. Su representación gráfica se realiza mediante el histograma, que para nuestro caso tendrá un eje X representado por las leyes del mineral y un eje Y representado por la frecuencia de datos observados en cada intervalo. Tratándose de elementos de la naturaleza, las variables en las que estamos interesados pueden asumir diferentes tipos de distribución con modelos matemáticos recurrentes.

2.11.3. Histogramas

El histograma es el más conocido de los gráficos para resumir un conjunto de datos numéricos. Una virtud del gráfico es, que retiene los valores de las observaciones, estos proporcionan una manera visual de la distribución de los datos de acuerdo con su frecuencia de ocurrencia, permite detectar ciertos errores como muestras anómalas de valores altos o bajos, nos permiten manejar la posibilidad de dividir los datos en poblaciones estadísticas separadas y puede mostrar cuánta asimetría respecto a su media puede presentar la muestra y la orientación de la cola. Comúnmente se utiliza un ancho de clase constante de manera que la altura de cada barra del histograma sea proporcional al número de valores en la clase. El histograma corresponde a una forma de representar la distribución experimental de los datos. Es decir, da una idea de la distribución real de la población.

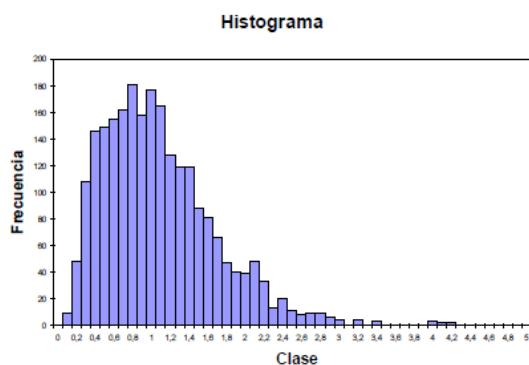


Figura 14. Histograma (Ortiz, 2006).

2.11.4. Gráficos probabilísticos

Otro instrumento usado que da una idea del comportamiento es la función de distribución acumulada $F(x)$ de la muestra, estos gráficos permiten determinar si una distribución es normal o no. Para los datos se gráfica la correspondiente frecuencia acumulada en un sistema de ejes cuya línea vertical es gaussiana; si los gráficos son derivados de una distribución normal el grafico será una línea aproximadamente recta y si se usa papel logarítmico y se obtiene que la curva es una recta, tendríamos una distribución Log-normal.

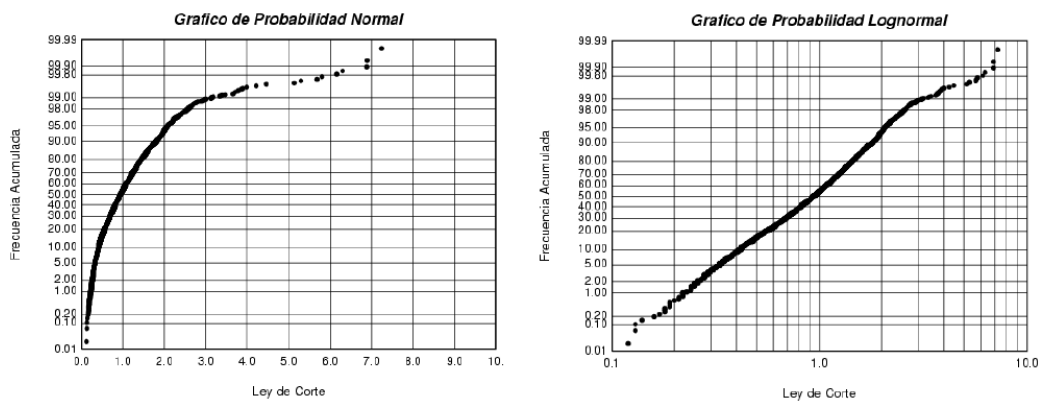


Figura 15: Modelos de histogramas (Ortiz, 2006).

2.11.5. Valor capping

El “capping” es el valor que separa las leyes minerales anómalas o outliers. Si algún valor de ley es mayor, este se reemplaza por el valor capping, el cambio se fija cuando hay valores altos y sirve para no sobreestimar el yacimiento.

El capping sirve para detectar:

- Los valores altos de ley de mineral
- Poblaciones anómalas de otros eventos geológicos
- Valores que no fueron detectados durante la etapa de QA/QC

2.11.6. Compositación

Es el resultado de uniformizar los tramos de muestreo de la data original a una longitud de tramo constante, esta longitud estará en función a la información disponible, de esta manera las muestras son más representativas y conseguimos que las variables sean aditivas.

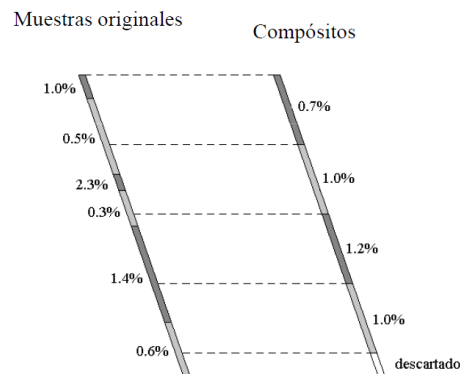


Figura 16: Muestras original y compositada (Universidad de Chile, 2014).

2.12. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se basa en un proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial de una variable regionalizada, compuesto por:

- El cálculo del semivariograma experimental
- Ajuste a este de un modelo teórico conocido

2.12.1. Variable regionalizada

La geoestadística es la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio (Matheron, 1962). Una variable regionalizada es aquella que representa el valor en el espacio (geográfico o temporal) de un atributo asociado a un fenómeno natural (fenómeno regionalizado).

Es posible caracterizar una variable regionalizada por:

- Naturaleza: Continua (ej. leyes minerales), discreta, categórica (ej. tipo de roca).

- Campo o dominio de extensión: Dimensiones espaciales abarcadas por la variable.
- Soporte: Volumen sobre el cual es medido la variable. Puede ser puntual o soportes mayores (bloques).

En ciertas ocasiones resulta complejo determinar, completamente y de forma exacta, una variable regionalizada debido a su variabilidad en el espacio.

2.12.2. Función aleatoria

Los modelos geoestadísticos consideran al valor $z(x)$ de la variable regionalizada en un lugar x del campo D , como una realización de una variable aleatoria $Z(x)$. Cuando x recorre D , se obtiene un conjunto de variables aleatorias $Z=\{Z(x):x \in D\}$ que constituye una función aleatoria (sinónimos: campo aleatorio, proceso aleatorio).

2.12.3. Variograma y variografía

El variograma es un gráfico en dos dimensiones donde el eje horizontal representa la distancia entre pares de muestras y el eje vertical representa el variograma de los datos analizados en una dirección dada.

De igual modo es una medida de la dependencia espacial (es decir, una medida de la creciente variabilidad) de datos a través de una cierta distancia. Las estadísticas de resumen y las distribuciones de dos conjuntos de datos pueden ser similares sin embargo la continuidad espacial es muy diferente. El análisis de variograma implica la generación de un variograma experimental y luego el ajuste de una línea o curva de la creación de un modelo de variograma que luego es utilizado durante los métodos de estimación kriging.

- **Variograma.** - El Variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentados separados una distancia h o lo que es lo mismo la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia de h (ver figura 17).

El cálculo del variograma experimental es la herramienta Geoestadística más importante en la determinación de las características de variables y correlación espacial del fenómeno estudiado

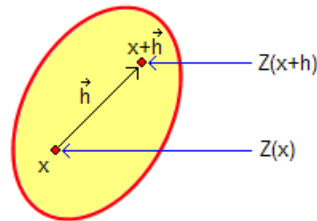


Figura 17: Dos puntos a la distancia vectorial h . (Alfaro, 2007).

La definición teórica de la función variograma $\gamma(h)$ es la esperanza matemática siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)} (v_i - v_j)^2$$

h = Distancia entre pares (lag)

N = Número de pares

v_{ij} = Valor de datos

Sin embargo, en la práctica siempre se utiliza el algoritmo siguiente:

$$\gamma(\bar{h}) = \frac{1}{2} \text{Promedio} \left\{ \begin{array}{l} \text{(diferencias)}^2 \text{ de leyes en puntos} \\ \text{que están a la distancia } \bar{h} \end{array} \right\}$$

Esta ecuación hay que adaptar en cada situación práctica (mallas regulares e irregulares en el espacio de n dimensiones, $n = 1, 2, 3$).

Las propiedades de $\gamma(h)$, que se deducen fácilmente de la definición son:

$$\begin{aligned} \gamma(0) &= 0 \\ \gamma(h) &\geq 0 \\ \gamma(-\bar{h}) &= \gamma(\bar{h}) \end{aligned}$$

La última relación proviene del hecho que si dos leyes z_1 y z_2 están a la distancia “ h ”, entonces $(z_1 - z_2)^2 = (z_2 - z_1)^2$

El variograma es la herramienta central de la Geoestadística, su importancia radica en que nos permite estimar los valores del efecto pepita, el alcance o grado de relación entre las muestras y la meseta

- **Efecto pepita:** Se denota por C_0 y representa una discontinuidad puntual del variograma en el origen, debido a que mide el error fundamental (error de muestreo y error de laboratorio), adicionalmente mide también la erraticidad propia de la variable en estudio (Marín, 2011).
- **El alcance:** Mide el grado de afinidad de la variable en estudio en las diferentes direcciones del yacimiento y es estimado a partir de la gráfica del variograma experimental, caracterizado porque la función que le ajusta es monótona, es una función creciente. Así cuando el aspecto del variograma deja de ser creciente se baja una perpendicular y se lee sobre el eje h el valor numérico que viene a ser el alcance.
- **Meseta:** Mide la variabilidad de las discrepancias al cuadrado, luego de haber identificado el alcance. Si la altura de la meseta es constante, quiere decir que la variable tiene estacionaridad. Si la altura es creciente, casi parabólica, entonces quiere decir que el variograma presenta efecto de deriva.

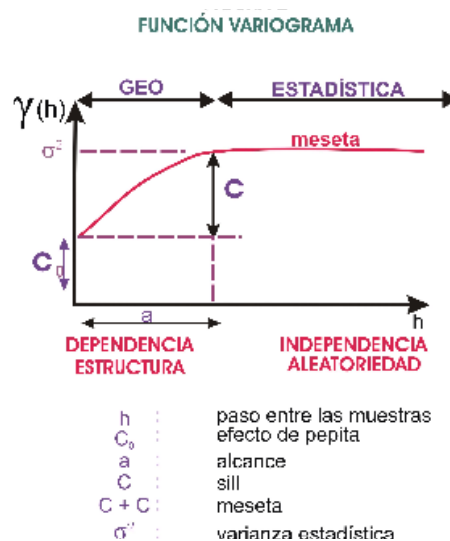


Figura 18: Representación gráfica de un variograma básico. (Canchaya, 2005).

- **Variografía**

La estimación geoestadística se basa en sacar provecho de la continuidad espacial de la variable regionalizada. El objetivo de la variografía es modelar dicha continuidad de la variable en estudio, debido a que los valores observados en distintos puntos del espacio pueden estar correlacionados. De esta manera es importante estudiar qué tan rápido o lento se pierde esta correlación al aumentar la distancia de separación entre dos puntos. Para desarrollar este estudio se utiliza el variograma que tiene por objetivo medir la variabilidad espacial, lo que considera dicha herramienta es principalmente la diferencia entre pares de datos que se encuentren separados por un cierto vector h . Bajo la hipótesis de estacionaridad, el variograma teórico y su estimador experimental se presentan en la ecuación.

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

Donde $z(x)$ corresponde a la variable regionalizada, $Z(x)$ a la función aleatoria asociada, $N(h)$ al número de pares de datos para una separación dada por un vector h , y x_i, x_i+h a las posiciones de los pares de datos ($i=1, \dots, N(h)$).

Si se siguen en estricto rigor las definiciones anteriores se puede llegar a variogramas experimentales con pocos pares de datos representativos, así el variograma experimental tendría entonces un aspecto muy errático y resultaría imposible interpretarlo y modelarlo. Para que sea más robusto se suele permitir algunas tolerancias de cálculo sobre las distancias y las direcciones, abarcando así un área definida. Es importante considerar que las tolerancias pueden cambiar las interpretaciones variográficas.

Las diferentes tolerancias atribuibles a los variogramas en 2D y la región de búsqueda de pares de datos se muestran en la Figura 18, donde h corresponde al vector

de separación, θ al azimut (contado en el sentido del reloj desde la dirección norte), Δh a la tolerancia en la distancia, $\Delta\theta$ a la tolerancia en el acimut, BW al ancho de banda (band width) y $T(h)$ a la región de tolerancia asociada al vector h .

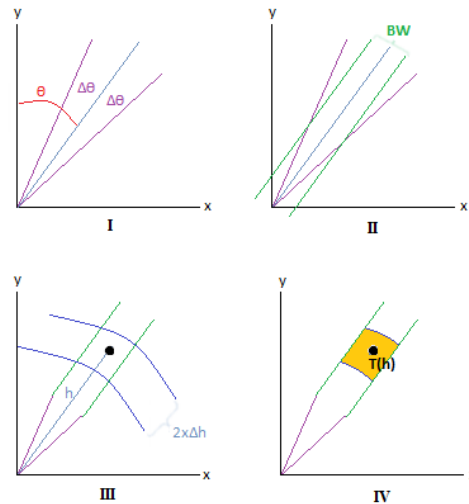


Figura 19: Tipos de tolerancia: I - construcción según tolerancia angular en torno a la dirección de azimut θ ; II - según ancho de banda; III- según tolerancia en la distancia; IV - área de tolerancia final. (Buscaglione, 2016).

Al considerar un ancho de banda infinitamente grande y una tolerancia en el azimut de 90° , el variograma experimental depende solamente de la norma del vector h y de la tolerancia en esta norma, no de la dirección de h . Tal variograma experimental se califica de “omnidireccional”. La definición de tolerancias es más compleja en 3D, donde se agrega una tolerancia en la inclinación (dip, contado positivamente desde el plano horizontal hacia arriba) y un alto de banda (band height).

Los parámetros para especificar y calcular un variograma experimental son los siguientes:

- Dirección de interés: azimut, inclinación.
- Distancias de interés, en general múltiplos de una distancia elemental (paso).
- Tolerancia en la dirección: tolerancia angular, ancho de banda.
- Tolerancia en las distancias.

El crecimiento indica la velocidad con la cual se “desestructura” la variable en el espacio; así se define como meseta al valor en el cual el variograma se estabiliza, y como alcance a la distancia que alcanza la meseta.

2.12.4. Modelamiento del variograma

El objetivo de ajustar un modelo teórico es disponer de una ecuación, la cual se utilizará en los cálculos posteriores. En general, los paquetes computacionales trabajan exclusivamente con el modelo teórico.

En la siguiente imagen (ver figura 20) se distingue los dos variogramas:

- El variograma experimental, que es el calculado a partir de los datos.
- El variograma teórico, que corresponde a una ecuación que se ajusta al variograma experimental:

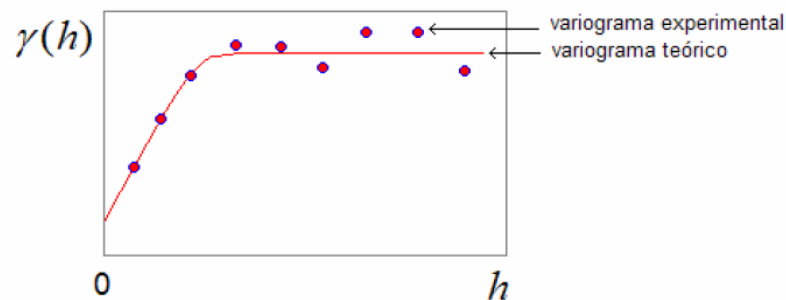


Figura 20: Variograma experimental vs variograma teórico. (Alfaro, 2007).

Es evidente que el variograma teórico debe respetar al variograma experimental, sobre todo en los primeros puntos, que son más confiables. El ajuste de los variogramas constituye un punto crucial, en un estudio geoestadístico, porque todos los cálculos posteriores se harán utilizando exclusivamente el modelo teórico. Para tener un buen ajuste, hay que considerar que uno de los objetivos finales es la de estimación de leyes de bloques (Modelo de bloques) dentro de cierta vecindad restringida de manera de no considerar demasiadas muestras para estimar la ley de cada bloque.



Los modelos de variograma teórico utilizados en el proceso de estimación deben satisfacer ciertas condiciones, es decir tienen que ser “definido positivo” o de “tipo positivo”. En general el ajuste de modelos teóricos al Variograma empírico se realiza de forma visual. Atendiendo a las dos características más importantes en el modelado del variograma que son:

- Su comportamiento en el origen, el cual puede ser lineal, parabólico y con Efecto de Pepita.
- La presencia o ausencia de Meseta.

Así como en estadística existen modelos (ley de Gauss, Lognormal, etc) en Geoestadística también existen modelos de variograma.

El modelo debe cumplir con las propiedades siguientes:

$$\gamma(0) = 0$$

$$\gamma(h) \geq 0$$

$$\gamma(-h) = \gamma(h)$$

2.12.5. Elipsoide de influencia

El elipsoide de influencia es una figura geométrica que cuantifica el grado de anisotropía de las leyes en estudio, en las diferentes direcciones de la mineralización. El elipsoide se construye luego de calcular los variogramas promedio en las diferentes direcciones de la veta en estudio. El variograma promedio que tiene mayor alcance (a1) va a constituir el eje principal del elipsoide con azimut y dip determinado, el segundo eje (a2) es el mayor alcance encontrado en el plano perpendicular al eje principal y el tercer eje (a3) es el producto vectorial de los dos primeros ejes, obteniéndose un eje perpendicular a ellos.

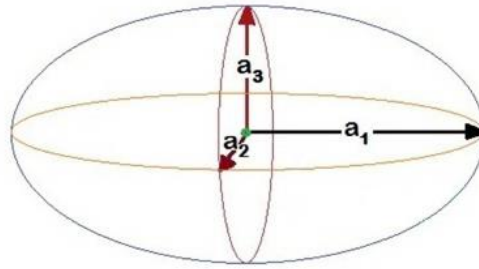


Figura 21: Elipsoide de influencia. (Marín, 1978).

2.13. MUESTREO GEOLÓGICO

El muestreo consiste en la toma de muestras mediante una técnica apropiada a fin de obtener una pequeña porción de mineral de un volumen mayor, en cualquier tipo de depósito mineral, de manera que cada muestra sea representativa del total de ese volumen. Generalmente, en un yacimiento mineral, la mineralización tiene distribución irregular por lo que los contenidos metálicos o no metálicos varían en sus diferentes partes, motivo por el cual una sola muestra de una parte del depósito no tendrá la misma proporción de minerales del yacimiento. Por esta razón es necesario extraer sistemáticamente suficiente cantidad de muestras a fin de obtener una óptima representatividad del yacimiento. (Manual de muestreo, San Rafael 2019).

2.13.1. Importancia del muestreo

El muestreo en minería es una de las actividades más importantes y necesarias que, en base a los resultados de los ensayos de las muestras, se evalúa si un yacimiento es económicamente rentable realizar su explotación o no. Procesando los resultados de muestreo se planeará y controlará una adecuada exploración, explotación y tratamiento metalúrgico. Un muestreo cuidadoso y preciso garantizará los resultados de los ensayos obtenidos para el cálculo de recursos y reservas. En la etapa de exploraciones, la evaluación de los resultados del muestreo juntamente con una buena interpretación geológica permitirá definir la bondad de un yacimiento y su consiguiente exploración. De manera similar para adquirir o vender un yacimiento que esté en explotación o



exploración, se hará una buena evaluación de las reservas, lo cual dependerá mucho de un muestreo confiable, porque un mal muestreo o muestras contaminadas conllevarán a definiciones desastrosas. (Manual de muestreo, San Rafael 2019).

a) Muestra

Es una parte o porción extraída de un conjunto, por métodos que permiten considerarla como representativa del mismo. El conjunto de muestras individuales será representativo del yacimiento. Esta muestra debe tener las características de representatividad, proporcionalidad y libre de contaminación.

c) Muestreo

Es la técnica empleada en la toma de muestra, de tal forma que la proporción y distribución de su calidad para análisis sean representativas del conjunto. Es la acción de recoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo o la técnica empleada en la selección de una pequeña parte estadísticamente determinada para inferir el valor de una o varias características del conjunto.

d) Población

Es el conjunto completo de observaciones que deseamos estudiar. El muestreo estadístico es diferente del muestreo de minerales:

- En el muestreo estadístico, el lote o población está compuesto por objetos de igual peso.
- En el muestreo de minerales, el lote está compuesto de objetos de diferentes pesos.

2.13.2. Objetivo del muestreo

El objetivo del muestreo es determinar los contenidos de los elementos útiles al hombre, presentes en un yacimiento de vetas u otras estructuras tabulares, cuerpos,



mantos, pórfidos, etc., así como para definir, entre otras cosas, sus reservas y su valor en base a las leyes de las muestras, reportadas por el laboratorio. Los ensayos de las muestras se utilizan durante las evaluaciones en las diferentes etapas de la actividad minera como prospección, exploración, desarrollo y producción. También se usan en:

1. Estimación de reservas, recursos y potencial del yacimiento,
2. Planeación de una explotación ordenada en base a las reservas existentes, las cuales contienen bloques de mineral con cuyos tonelajes y leyes se hará un adecuado blending, de manera que se envíen a la planta, mineral con leyes lo más uniforme posible, que conllevará a una mejor eficiencia metalúrgica
3. Control de calidad, muy necesario durante el minado (explotación) y tratamiento metalúrgico
4. En prospección geoquímica para el análisis por multielementos, a fin de definir la presencia de anomalías geoquímicas que ayuden a interpretar la geología, así como orientar mejor las exploraciones
5. Definir el valor de los productos refinados que se van a vender o comprar.

2.13.3. Cualidades necesarias de una muestra

Una verdadera muestra deberá tener una cualidad excepcional para considerarla como tal, pues debe reunir los siguientes requisitos:

1. Tiene que ser **representativa**, vale decir, que en ella deben estar representadas en cuanto a contenidos, las diferentes partes de la zona de donde proviene la muestra.
2. Debe ser **proporcional**, que las diferentes partes mineralizadas de la zona muestreada deben figurar en cantidad proporcional en la muestra, para lo cual la extracción del material que se muestrea tiene que ser en forma muy uniforme.



3. Debe estar **libre de contaminación**, no debe incluirse, inconscientemente en la muestra, materiales extraños a la zona de muestreo. La contaminación que se hace intencionalmente se llama “salado de muestras”. La detección de “muestras contaminadas” será causa para desecharlas.

2.14. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD QA/QC

Los programas de Aseguramiento y Control de la Calidad (ACC), también conocidos por sus siglas en inglés como de QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*), es asegurar la integridad de la información, y en última instancia garantizar que los datos generados sean de naturaleza y estándares tales que permitan su utilización en estimaciones de recursos y reservas, control de leyes, reconciliaciones, etc.

Mientras que el aseguramiento de la calidad comprende aquellas acciones sistemáticas y preestablecidas orientadas a elevar el nivel de la confianza de un programa de exploración, el control de la calidad abarca los procedimientos rutinarios seguidos para monitorear la calidad. Por lo tanto, mientras que el aseguramiento de la calidad lleva implícita la idea de prevención, el control de la calidad se relaciona con la detección de problemas.

De una forma u otra, la preocupación por la calidad de la información geológica ha estado siempre presente en la práctica de la profesión. Sin embargo, sólo durante los últimos años, y tras varios lamentables incidentes que conmocionaron la industria minera mundial, ésta ha asimilado de forma real la indisoluble relación existente entre la calidad de la información primaria y la confiabilidad de las estimaciones de recursos y reservas. En consecuencia, estrictas normativas han sido elaboradas e implementadas recientemente por los principales centros mineros mundiales, con el fin de elevar y uniformar los estándares de trabajo. (Simón,2008).



2.14.1. Aseguramiento de la calidad

Long (2000) identifica tres tipos fundamentales de errores: los de tipo I, ocasionados por omisión o negligencia, que pueden ser usualmente evitados mediante la aplicación de técnicas correctas; los de tipo II, de muestreo o medición, de naturaleza aleatoria, cuya acción no puede ser evitada, aunque su efecto puede ser minimizado; y los de tipo III, de naturaleza sistemática, cuyo efecto también puede ser minimizado. Un programa de Aseguramiento de la Calidad debe incluir indicaciones y recomendaciones orientadas a reducir el efecto de esos errores, y en especial los de tipo I. A continuación, se enumeran sólo algunos de los más comunes, así como algunas recomendaciones para evitarlos o reducir su efecto.

A) Heterogeneidad geológica

Entre los problemas más comunes relacionados con la heterogeneidad geológica se destacan el uso de redes de exploración inadecuadas, errores en la codificación de los datos, el uso de programas inadecuados de estimación, la utilización de personal poco calificado, etc. Para reducir su efecto se recomienda utilizar personal con la mejor calificación posible, preparar colecciones de muestras patrón que auxilien en el logueo, usar métodos de procesamiento de los datos, que apliquen métodos estadísticos basados en el rango de influencia.

B) Toma de muestras

Entre los principales errores que se cometen durante esta operación se encuentran los siguientes: el muestreo predominante del material más blando o frágil, o de fragmentos grandes de material duro en el muestreo de canal; la orientación incorrecta de la línea de corte en el muestreo de testigo, así como el muestreo preferencial de fragmentos gruesos en muestras de testigo muy fragmentado; ignorar los contactos



litológicos importantes; la introducción de sesgos en la selección de fragmentos o intervalos en el muestreo para densidad; confusiones en el etiquetado y el orden de las muestras.

Para reducir su efecto se recomienda usar procedimientos de muestreo que garanticen una adecuada representatividad de las muestras, conocer con la mayor exactitud posible la ubicación física y la orientación de los sondajes y los intervalos de muestreo, manipular las muestras con extremo cuidado.

C) Medición de parámetros

Los errores durante la medición de los parámetros se producen en varias fases de este proceso. Durante la preparación, son frecuentes el chancado demasiado grueso, el uso de técnicas de cuarteo deficientes, la insuficiente pulverización, la manipulación incorrecta de las muestras, el empleo de un deficiente sistema de extracción de polvo, etc.

Durante los análisis químicos o físicos se constata con frecuencia el empleo de métodos analíticos inapropiados, el no uso de estándares de tipos o niveles adecuados, la aplicación de procedimientos incorrectos de cálculo, la determinación de densidad sin considerar la presencia de porosidad en la roca, las alteraciones en el orden de las muestras, etc. Estos errores se potencian cuando el laboratorio tiene un sistema deficiente de Control de Calidad, y aún más, por extraño que pueda parecer, cuando tal programa es inexistente.

Al reportar los resultados, son también frecuentes el uso indistinto de variados formatos de tablas, números y símbolos, los errores en las unidades de medida empleadas, la ausencia de información sobre los métodos empleados y sus límites de detección, etc. Para reducir el efecto de estos errores, se recomienda asegurarse de que el laboratorio seleccionado emplea procedimientos adecuados de preparación, dispone de instrumental



y equipos en buen estado, y productos químicos y estándares confiables, que utiliza procedimientos estandarizados de reporte, y también de que emplea un sistema adecuado de Control de Calidad y que mantiene sus áreas de trabajo limpias y ordenadas.

D) Preparación de la base de datos

Algunos de los errores vinculados a la preparación de la base de datos ocurren durante la propia introducción de la información. Son comunes la digitación repetida de los datos, el uso de fórmulas en la numeración de las muestras en tablas de Excel, la insuficiente información sobre datos faltantes, la codificación errónea de las muestras de control de calidad, etc.

Entre las recomendaciones para reducir su efecto se incluyen planificar adecuadamente la estructura y el flujo de la información, establecer filtros y mecanismos de contrachequeo, minimizar la digitación manual de datos, utilizar la doble entrada para los parámetros más sensibles, mantener una disciplina estricta en el completado de la base de datos, etc.

2.14.2. Control de calidad

Por lo general, durante una campaña de muestreo se utilizan dos laboratorios: uno primario, donde se analizan todas las muestras ordinarias, y uno secundario, comúnmente un laboratorio de reconocida reputación, en el cual se reanaliza una porción representativa de las muestras ordinarias previamente analizadas en el laboratorio primario. El programa de Control de Calidad consiste en la inserción sistemática de muestras de control en los lotes enviados al laboratorio primario, y en el reenvío regular al laboratorio secundario de una parte de las muestras ya analizadas en el laboratorio primario, también acompañadas por muestras de control. Tanto en uno como en otro caso las muestras de control deben ser preparadas, empaquetadas, numeradas y enviadas de tal manera que se



evite, en lo posible, su identificación por parte de los laboratorios evaluados. Al implantar o evaluar los resultados de un programa de ACC en la actividad geológica, es importante conocer tres conceptos básicos, que se describen de modo sucinto a continuación:

A) Precisión

Es la habilidad de reproducir consistentemente una medición en condiciones similares. Vinculada a errores aleatorios, su evaluación exige reproducir la medición en condiciones tan cercanas como sea posible a las existentes en el momento en que tuvo lugar la medición original. En el caso del muestreo geológico, por ejemplo, tanto la muestra original como la duplicada deben corresponder a iguales intervalos, métodos similares de muestreo, y se debe prever su envío simultáneo al mismo laboratorio, de modo que se garantice el empleo de iguales procedimientos de preparación y análisis, utilizando los mismos equipos y reactivos, y en lo posible el mismo personal. Por tanto, es necesario que ambas muestras formen parte del mismo lote

B) Exactitud

Se define como la proximidad de los resultados a un valor verdadero o aceptado, y se vincula a errores sistemáticos. El concepto de exactitud está indisolublemente vinculado al de valor real. Al determinar la ley de la muestra, nunca se llega a conocer el valor real; sin embargo, es posible preparar estándares en condiciones muy controladas, y establecer el mejor valor (MV) del estándar para cada elemento en particular. Por otra parte, el intervalo de confianza (IC), también conocido como error estándar de la media, evaluado con un nivel de significación de 0.05, identifica al intervalo alrededor de 1 MV en el cual la probabilidad de ocurrencia del valor real es igual al 95%. Tanto el MV como el IC que caracterizan al estándar deben ser establecidos a través de múltiples análisis en una serie de laboratorios de elevada reputación técnica.

Se recomienda tratar la exactitud como una característica cualitativa (baja exactitud, elevada exactitud), y el sesgo como un parámetro cuantitativo, entre los cuales existe una relación inversa: a mayor sesgo, menor exactitud, y viceversa.

C) Contaminación

Al preparar o analizar algunas muestras, particularmente las muy mineralizadas, es posible que cierta porción de una muestra o de una solución quede retenida accidentalmente en el equipo y contamine las muestras siguientes. La contaminación se estudia a través de los blancos, que son muestras estériles, en las cuales los elementos a evaluar se encuentran presentes en cantidades inferiores o muy cercanas a los correspondientes límites de detección.

Se considera que se ha producido un nivel significativo de contaminación de un elemento cuando los blancos arrojan valores que exceden varias veces el límite de detección para dicho elemento. Siempre que sea posible, la matriz de los blancos debe ser cercana a la matriz del material que está siendo analizado en las muestras ordinarias.

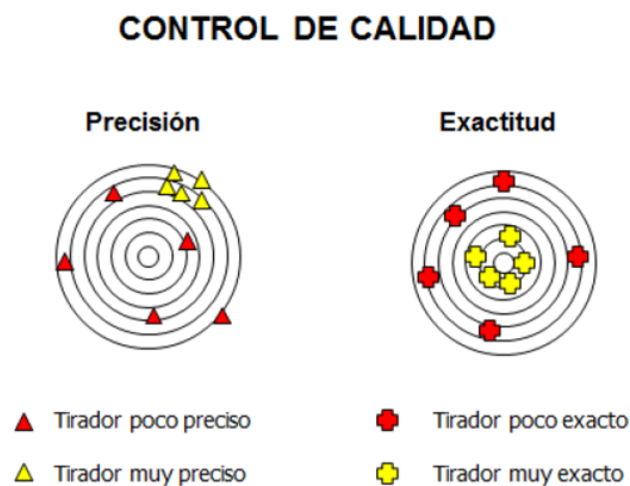


Figura 22: Precisión vs Exactitud. (Simón, 2005).



2.14.3. Programa de control de calidad

Un programa de Control de Calidad debe evaluar las etapas esenciales de la secuencia muestreo-preparación-análisis, en un esfuerzo por determinar reducir al mínimo el error total posible (Long, 2000).

Las etapas y los parámetros monitoreados en cada una de ellas se muestran a continuación:

- Muestreo: error (o precisión) de muestreo.
- Preparación: error (o precisión) de sub-muestreo; contaminación durante la preparación.
- Análisis: exactitud, precisión y contaminación analíticas.
- Entrada de datos: exactitud de la entrada de datos.

Las tres primeras fases pueden ser monitoreadas a través de la inserción aleatoria de varios tipos de muestras de control. Es posible supervisar la calidad de la entrada de datos a través de la doble entrada independiente de la información más sensible. Algunas muestras de control deben ser tomadas y/o insertadas por parte del personal del proyecto directamente durante el proceso de muestreo, estas muestras son las siguientes:

A) Muestras gemelas (o muestras de un cuarto de testigo).

Se obtienen al realizar un canal paralelo sobre el área donde previamente se ha colectado una muestra, o al dividir por la mitad las muestras de testigo diamantino, de modo que un cuarto representa la muestra original, y otro cuarto representa la muestra gemela; ambas muestras deben ser preparadas en el mismo laboratorio y analizadas con diferente número en el mismo lote. Las muestras gemelas se usan para evaluar el error de muestreo. Se recomienda evitar el uso en este caso del término de duplicado, ya que el original y la muestra gemela ocupan, formalmente, diferentes posiciones espaciales.



B) Duplicados gruesos (o de preparación).

Son duplicados tomados inmediatamente después de una fase de chancado y cuarteo, que deben ser analizados en el mismo laboratorio, con diferente número, y en el mismo lote que la muestra original. Los duplicados gruesos se usan para evaluar el error de cuarteo o submuestreo.

C) Blancos gruesos.

Son muestras de material estéril, con granulometría gruesa, que deben ser sometidas a todo el proceso de preparación en conjunto con las demás muestras ordinarias, y que deben ser preparadas a continuación de muestras fuertemente mineralizadas. Los blancos gruesos permiten evaluar si se produce contaminación durante la preparación

D) Duplicados de pulpa (o duplicados internos).

Son duplicados de muestras ordinarias previamente pulverizadas, que son enviados con diferente número al laboratorio primario para su análisis en el mismo lote analítico que las muestras originales. Estas muestras se utilizan para evaluar la precisión analítica del laboratorio.

E) Blancos finos.

Son muestras de material estéril pulverizado, que deben ser analizadas a continuación de muestras fuertemente mineralizadas, y que se utilizan para determinar si se produce contaminación durante el proceso de análisis.

F) Estándares.

Son muestras elaboradas bajo condiciones especiales, que deben formar parte de los lotes analizados tanto por el laboratorio primario como por el laboratorio secundario.



Los estándares se utilizan para evaluar la exactitud analítica, en conjunto con las muestras de control externo. Al elegir los estándares se recomienda seleccionar, en lo posible, materiales de composición aproximadamente similar a la de las muestras ordinarias, a los efectos de reducir al mínimo el efecto analítico de la matriz mineral.

G) Duplicados externos.

Son duplicados de muestras ordinarias previamente pulverizadas, que son reanalizados en el laboratorio secundario. Estas muestras son utilizadas para evaluar la exactitud analítica del laboratorio primario, de modo complementario a los estándares.

H) Pruebas granulométricas.

Como parte de los controles externos también se debe solicitar al laboratorio secundario que realice chequeos granulométricos a una parte de las pulpas, con el fin de chequear la calidad de la pulverización en el laboratorio primario. La proporción de muestras de control puede ser ajustada durante el programa en dependencia de los resultados. Sin embargo, se recomienda que en un principio las muestras de control comprendan entre 20% y 25% del número total de muestras enviadas al laboratorio (Tabla 1). Adicionalmente, los lotes de control externo también deben incluir duplicados de los propios duplicados externos, además de estándares y blancos finos, para evaluar de modo independientemente la precisión, la exactitud y la posible contaminación, respectivamente, en el laboratorio secundario.



Tabla 1: Frecuencias recomendadas de muestras de control.

Tipo de Muestra de Control	Frecuencia de Inserción
Muestras gemelas	1 en 30 a 50
Duplicados gruesos	1 en 30 a 50
Blancos gruesos	1 en 30 a 50
Duplicados de pulpa	1 en 30 a 50
Estándar bajo	1 en 20, alternadamente
Estándar medio	
Estándar alto	
Blancos Finos	1 en 30 a 50
Duplicados externos	1 en 20
Chequeos granulométricos	1 en 10, en los lotes de control

Fuente: (Simón, 2008).

CAPÍTULO III

MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de la investigación

El tipo de investigación aplicada para este trabajo de investigación es descriptivo, analítico, las cuales se basan en la revisión bibliográfica, recolección de datos, análisis e interpretación de resultados y propositivo por que tiene como fin la estimación y generación de un modelo geológico de recursos categorizado en recursos medidos, indicados e inferidos, teniendo como data inicial las interpretaciones geológicas, planos de muestreo y los valores de leyes de estaño reportados por laboratorio químico, se emplean sólidos modelados en 3-D y software minero geoestadístico especializado DataMine y el interpolador kriging ordinario.

3.1.2. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación se llevó a cabo teniendo como referencias los procedimientos establecidos por los códigos internacionales referidos a la estimación de recursos minerales, La metodología seguida se detalla en la figura 23.

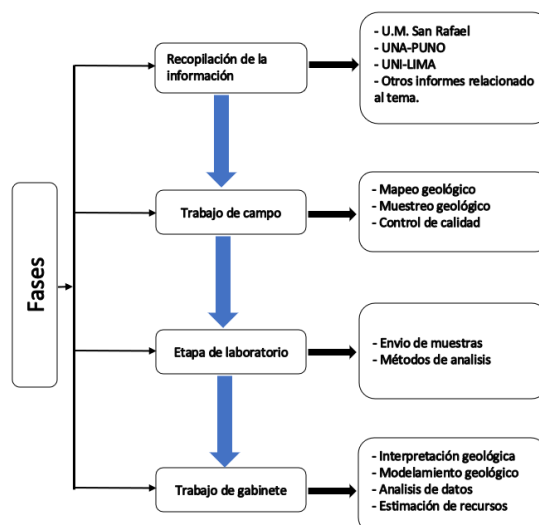


Figura 23: Flujograma de la metodología seguida para la elaboración del proyecto de investigación.



3.1.3. Definición de variables

Variable independiente

Sistema de vetas Vicente

Variable dependiente

Estimación geoestadística de recursos

3.1.4. Población y muestras

Población

Se establece como la población del trabajo de investigación al conjunto de vetas y cuerpos que forman parte del sistema Vicente.

Muestra

Las muestras del trabajo de investigación están compuestas de canales y sondajes diamantinos extraídos en interior mina.

3.1.5. Etapas de la investigación

3.1.5.1. Recopilación y revisión de la información

En la primera etapa se realizó una intensa búsqueda, revisión y selección de información existente, estudios previos realizados en la zona, revisión bibliográfica de la geología local y regional del cuadrángulo de Macusani hoja 29-V del INGEMMET boletín N°79, tesis, informes técnicos internos, externos y metodología y procedimientos de estimación de recursos que fueron empleados en diferentes unidades mineras

3.1.5.2. Etapa de campo

El trabajo de campo consistió en el reconocimiento y delimitación del área de estudio, realización de mapeos geológicos subterráneos a escala 1:500, identificación y registro de estructuras, recolección de muestras sistemáticas en labores mineras.



- **Mapeo geológico subterráneo**

Se realizó el cartografiado geológico en galerías, subniveles y rampas, se usó como base topográfica los planos con levantamiento topográfico efectuado con estación total, la escala del mapeo utilizado es 1:500 que normalmente se emplea en la mayoría de los yacimientos, el formato que se emplea para el cartografiado geológico es de tamaño A4 en papel herculene o similar en el cual está dibujado la labor a mapearse con los puntos y detalles topográficos que sirven de referencia.

Para el inicio del cartografiado geológico en labores subterráneas, se revisan las condiciones de seguridad (desquinche y ventilación), luego se procede a lavarlas para que la observación de los rasgos geológicos sea mejor visualizado. También se utiliza una cinta de 30m, la cual se extiende desde un punto de referencia. En el formato de mapeo debe figurar, además de las Coordenadas y el Norte, el trazo de la labor que incluye los puntos de referencia.

Seguidamente se empieza a graficar la geología en el formato A4 debidamente adherido al tablero de aluminio, manteniendo el siguiente orden: rasgos estructurales (fallas, brechamientos, fracturas tensionales, diaclasas, estratificación, juntas, etc.), estructuras mineralizadas, ramales mineralizados, alteraciones de las cajas (indicando grado de alteración), disseminación de minerales, litología, contactos, pliegues (si los hay), etc. también se debe indicar los rumbos y buzamientos de las estructuras. La información geológica ploteada en el formato A4 se transfiere, en gabinete, a planos estándares establecidos, los cuales sirven para las interpretaciones geológicas en planos en secciones transversales y en planta.



- **Método de muestreo, técnicas y procedimientos**

El método de muestreo por canales se emplea prácticamente en todas las minas del Perú y en particular en esta unidad minera, es el de más uso para la estimación de recursos. El método consiste en extraer muestras en canales rectangulares previamente marcados en el terreno en forma transversal al rumbo y perpendicular al buzamiento de las estructuras tabulares o cuerpos elongados a intervalos regulares.

Se realiza el muestreo de canales, primeramente, la ubicación de los canales debe estar referida a puntos topográficos, luego se procede a marcar el canal con pintura, manteniendo la separación entre muestras. El Canal y las muestras son marcados y definidos por el muestrero en coordinación con el geólogo, quien puede corregir teniendo en cuenta, bandeamientos, textura, variación mineralógica, etc. La distancia estándar entre canales es de 3 m.

La extracción de cada muestra se realiza por separado y secuencialmente. Se percute uniformemente con el martillo mecánico. evitando el error de extracción por la diferente dureza que pueda haber en la estructura, teniendo en cuenta que nunca debe sacarse más cantidad de las partes más suaves, debiendo eliminarse los fragmentos grandes que caigan en la bolsa. Además, al final el canal de la muestra deberá notarse bien definido y nítido, tanto en el ancho, profundidad y correspondiente longitud. Una vez extraída la muestra, se sella o amarra en la misma labor, colocándose en su interior la Tarjeta de Muestreo y la etiqueta de código de barra correspondiente.

El muestreo de sondajes es un método que consiste en la ejecución de sondajes para tomar muestras en estructuras mineralizadas mediante el uso de máquinas de perforación con brocas diamantinas, con las cuales se obtendrán muestras cilíndricas (testigos de perforación).

Los testigos de perforación son separados en tramos de acuerdo con sus características mineralógicas, estructurales y/o de alteración. Los tramos de interés son escogidos para los análisis correspondientes que constituyen las muestras. Cada tramo se corta por la mitad cuidadosamente a lo largo del testigo con una cortadora de discos diamantados, siguiendo una línea pintada que será perpendicular a la orientación de las vetillas o estructuras mineralizadas.

- **Dimensiones y Cantidad de Muestra.**

La longitud total del canal es desde la caja techo hasta la caja piso de la estructura, la delimitación de las muestras se realizó de acuerdo con las características geológicas (por ejemplo: cambios en características de la mineralización o alteración). Las muestras deben ser marcadas en el techo de las labores, perpendiculares a la dirección de la veta o estructura, en el caso de que el ancho de la veta sobrepase las dimensiones de la labor el muestreo se realiza en el techo de la estocada programada para su delimitación respectiva. La longitud de una muestra dentro de un canal no debe exceder de 1.50 m. ni debe ser menor a 0.10 m. El peso mínimo de muestra colectada es de 400 gr, si no se consigue esta masa se profundiza más la longitud y el ancho de toda la muestra, de acuerdo con los siguientes parámetros

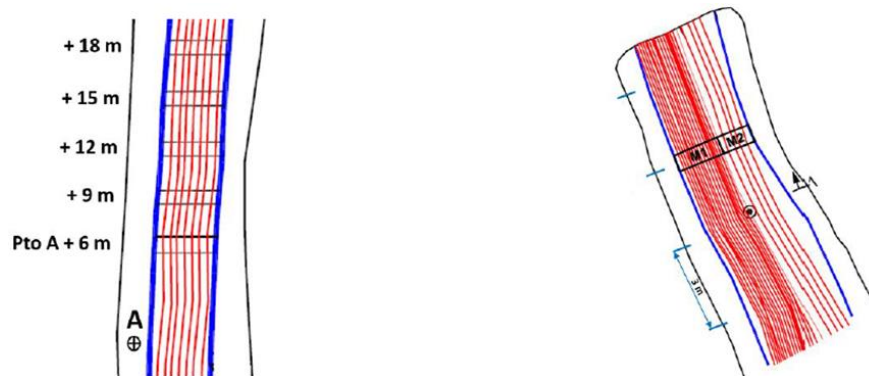


Figura 24: Muestreo sistemático de canales. (Manual de muestreo geológico Minsur, 2019).

Tabla 2: Longitud y ancho de muestreo.

Long. de Muestra (cm)	Ancho de Muestra (cm)	Prof. de Muestra (cm)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Peso (g)
10	7.5	2.0	150.00	2.8	420.00
15	5.0	2.0	150.00	2.8	420.00
20	5.0	1.5	150.00	2.8	420.00
25	4.0	1.5	150.00	2.8	420.00
30	3.2	1.5	144.00	2.8	403.20
35	3.2	1.5	168.00	2.8	470.40
40	3.2	1.5	192.00	2.8	537.60
45	3.2	1.0	144.00	2.8	403.20
50	3.2	1.0	160.00	2.8	448.00

Fuente: (Manual de muestreo geológico Minsur, 2019).

Todas las muestras obtenidas ya sean de canales de muestreo y de testigos de perforación son enviadas íntegramente al laboratorio.

- **Control de calidad**

En esta etapa del muestreo tiene un rol muy importante el “control de calidad”, se realizaron una serie de inserción de muestras de control que a continuación se detallan cada una de ellas.

Inserción de muestras gemelas

Se extrae la muestra gemela inmediatamente después de extraer la muestra original, por el mismo equipo de muestreo, esta se ubica paralelamente a la muestra original a una distancia aproximada de 0.10 m.



Figura 25: Toma de muestras gemelas. (Manual de muestreo geológico Minsur, 2019).



Inserción de duplicados gruesos

Se verifica que las muestras lleguen en buenas condiciones y asegurar el cumplimiento del proceso de cadena de custodia de muestras de mina (canales y cores). Verificar que el laboratorio esté procesando las muestras correctamente y en el orden correcto de acuerdo con la guía de remisión de envío. Obtener el duplicado grueso a partir de la primera división de la muestra; después del chancado de la misma, donde una de las mitades es la muestra original y la otra mitad es el duplicado. Los duplicados de gruesos son insertados en el caudal de muestras con una proporción mínima de 2 %. Los datos de duplicados gruesos se registran en una base de datos y se exportan en un archivo Excel.

Inserción de duplicados pulpa

Se verifica la limpieza de la pulverizadora de anillos con aire comprimido, se realiza antes y después de cada muestra pulverizada. Se extraen de 03 a 04 rechazos de pulpas y se tiene cuidado en identificar la muestra elegida como duplicado fino. El duplicado de pulpa tendrá una tarjeta codificada de manera predeterminada y definida para el lote, Insertar el duplicado de pulpa en el mismo lote de las muestras regulares. Los duplicados de gruesos son insertados en el caudal de muestras con una proporción mínima de 2%, los datos de duplicados pulpa se registran en una base de datos y se exportan en un archivo Excel.

Inserción de estándares

Se Incluye muestras estándar de forma anónima en el flujo analítico del lote de muestras enviadas al Laboratorio Químico de la Unidad. Tomar el estándar certificado y vaciar 50 gr. del contenido en un sobre manila, se etiqueta el sobre siguiendo los códigos correlativos y traslada las muestras al laboratorio, evitando la contaminación. El estándar es intertado aleatoriamente. Los estándares (Ley alta, media y baja) son insertados en el



caudal de muestras con una proporción aproximada 6%, los datos de estándares se registran en una base de datos y se exportarán en un archivo.

Inserción de controles externos

Se compila la lista de pulpas que son enviados al Laboratorio Externo. la compilación de pulpas es de acuerdo con las pulpas con leyes altas, medias y bajas seguidamente se dirige al almacén del laboratorio con la lista a tomar las pulpas escogidas. Se ordena las pulpas de acuerdo con sus códigos y son colocados en sobres nuevos, asignándoles nuevos códigos para su remisión al laboratorio externo, se incluye en el lote, muestras de duplicados finos, estándares y blancos finos; con el fin de evaluar la precisión analítica, la exactitud y la contaminación en el análisis del laboratorio externo.

Inserción de blancos gruesos

Se preparan muestras de blancos gruesos con un peso aproximado de 500 gr y un tamaño de partícula < 2 cm, insertarlas de forma anónima en el flujo analítico del lote de muestras, son insertados de acuerdo con el siguiente orden: muestra de alta ley, blanco fino, blanco grueso (siempre y cuando la mineralización sea notoria). Los resultados de los blancos gruesos deben estar por debajo de 05 veces el LPD de Laboratorio Químico de la Unidad, los datos de blancos gruesos se registrarán en una base de datos.

Inserción de blancos finos

Los blancos finos se obtienen a partir de la pulverización de cierta cantidad de blancos gruesos, se prepara muestras de blancos finos con un peso aproximado de 50 gr. Se insertan muestras de blancos finos de forma anónima en el flujo analítico, los blancos finos serán insertados de acuerdo con el siguiente orden: muestra de alta ley, blanco fino, blanco grueso (siempre y cuando la mineralización sea notoria). los blancos finos serán insertados al caudal de muestras con una proporción mínima de 2%. Los resultados de los



blancos finos deben estar por debajo de 03 veces el LPD de Laboratorio Químico de la Unidad Minera, los datos de blancos finos se registrarán en una base de datos y se exportarán en un archivo.

3.1.5.3. Etapa de laboratorio

La preparación de muestras, provenientes de mina subterránea (canales) y la de perforación diamantina, está a cargo del laboratorio químico quien primero recepciona las muestras y verifica la conformidad contrastando con la guía de remisión, posteriormente se genera la hoja de trabajo, luego estas muestras son depositadas en bandejas de acero inoxidable sobre papel Kraft y se procede con el secado, pasan por chancado primario (Roco 5"X6") y posteriormente a chancado secundario (Rocklabs) a malla 10 (Tyler), obteniendo un peso aproximado de 150gr a 100gr. Esta reducción es pulverizada en un equipo de discos al 95%, en una malla de 140 (Tyler) y son colocados en sobres codificados.

En el análisis, las muestras previamente pulverizadas en la sección de preparación son pesadas en una balanza exclusiva para muestras de mina. Se pesan 0.5gr en una balanza calibrada a escala digital, a esta muestra se le agrega un fundente que es el peróxido de sodio, la finalidad de este proceso es oxidar toda la muestra para facilitar la formación de la solución y liberar la casiterita (SnO_2). Luego, la muestra es lixiviada con ácido clorhídrico (HCl) pasando el Sn a fase líquida, reduciéndose posteriormente con níquel metálico y por último se determina el % de Sn mediante la titulación yodimétrica, que es un proceso de determinación del % Sn calculado por el volumen gastado de la solución de yoduro. El Laboratorio Químico de la mina San Rafael cuenta con la certificación y procedimientos para la preparación y el análisis de muestras.

A continuación, se muestra los métodos analíticos y la precisión de estos:

Tabla 3: Límites máximos y mínimos de detección.

Descripción	Límite de Cuantificación Inferior	Límite de Cuantificación Superior
Determinación de Azufre en minerales y concentrados por IR (Combustión equipo LECO)	S 0.001 %	S 50 %
Determinación de Estaño en muestras de mina y exploraciones por Volumetría	Sn 0.03 %	Sn 80 %
Determinación de Estaño en Gravimetría y Flotación por Volumetría	Sn 0.03 %	Sn 80 %
Determinación de Estaño en muestras de Pruebas Metalúrgicas y Especiales por Volumetría	Sn 0.03 %	Sn 80 %
Análisis de Estaño en Muestras de Mina por rayos X- Asoma	Sn 0.03 %	Sn 80 %
Análisis de Estaño en Muestras de Mina por rayos X- Asoma	Sn 0.03 %	Sn 80 %

Fuente: (Laboratorio químico mina San Rafael, 2019).

Los resultados de los análisis son registrados en un Informe de Ensayos, los cuales son colocados en una base de datos. El Laboratorio de la mina realiza los análisis para los diferentes elementos, empleando todos los procedimientos y estándares que se tiene implementado en el área de geología, utilizando los siguientes métodos:

- Determinación de Sn en muestras de mina y exploraciones por Volumetría.
- Análisis de Sn en muestras de mina y planta por rayos X ASOMA.

Determinación de la densidad aparente de mineral y roca encajonante

Para obtener la densidad aparente del mineral y de roca encajonante, en la mina San Rafael, se colectan muestras de mano provenientes de interior mina y muestras de testigos de perforación diamantina, las cuales son enviadas al laboratorio para determinar su densidad aparente por el método de la parafina. El procedimiento para la toma de muestras de mano para la determinación de la densidad aparente es el siguiente:

- Ubicar el punto de extracción de la muestra de mano, el cual se ubicará sobre un canal previamente muestreado, cuya separación será de acuerdo con la definición del geólogo.
- Se debe asegurar que la extracción de las muestras sea representativa de todo el ancho de la estructura mineralizada (Veta, Caballo, Zonas de Alteración).
- Extraer muestras de mineral, alteración y desmonte donde sea necesario (caballos y en la estructura).



- Extraer la muestra de mano de un tamaño aproximado de un puño (7 x 7 x 7 cm) con ayuda de comba y cincel y/o martillo percutor.
- Colocar la muestra en una bolsa de polietileno donde se le adjuntara el código correlativo del talonario asignado para este fin.
- Registrar en la tarjeta de muestreo datos de Fecha, Tipo de Muestra (Veta, Alteración o Desmonte), Veta, Nivel, Labor, Referencia, Nro. de Canal.
- Trasladar la muestra a superficie para realizar la descripción macroscópica de la muestra.
- Realizar el registro fotográfico de la muestra incluyendo en la fotografía un flexómetro que sirva a manera de escala.
- Embalar la muestra de mano para su posterior envío a Laboratorio para determinar la densidad aparente.

Los datos de densidades aparentes, obtenidos de la colección de muestras, han permitido realizar trabajos estadísticos para determinar valores de densidad aparente medios para cada población de datos. El trabajo estadístico permitió utilizar la MEDIANA como estadígrafo principal en la asignación. Por cantidad de datos \geq a 50 muestras, las Vetas, Vicente Centro y Vicente Piso han obtenido valores de densidad aparente únicos derivados de las medianas de sus poblaciones de datos, mientras que las demás vetas se les asigno el valor de la mediana de la población total de datos un análisis similar se realizó para la determinación del material estéril

Tabla 4: Datos de densidades aparentes del sistema de vetas Vicente.

	VICENTE CENTRO	VICENTE CENTRO PISO	VICENTE PISO	VICENTE RAMAL PISO
Min	2.66	2.61	2.57	2.64
Q ₁	2.74	2.74	2.71	2.78
Average	2.81	2.82	2.79	2.85
Median	2.78	2.81	2.77	2.81
NroSamples	54	42	246	25
Q ₃	2.88	2.92	2.85	2.97
Max	3.11	3.09	3.14	3.12
IQR	0.15	0.17	0.15	0.20
Upper Outliers	1.00	0.00	9.00	0.00
Lower Outliers	0.00	0.00	0.00	0.00

Unidades expresadas en t/m³

Los valores aplicados corresponden a las medianas de cada población

3.1.5.4. Etapa de gabinete final

Una vez concluido la etapa de campo y laboratorio se procede al trabajo de gabinete que inicia con la digitalización del mapeo e interpretación geológico, modelamiento geológico tridimensional, elaboración de la base de datos del muestreo de canales y sondajes diamantinos y finalmente concluir con la estimación de recursos por el interpolador geoestadístico kriging ordinario.

- **Interpretación geológica**

Se realiza la interpretación geológica por el método de secciones geológicas verticales y horizontales cada 12 m. con ayuda del mapeo geológico realizado en los laboreos subterráneos que corresponden y que cuentan con la información de resultados de leyes ya sea de canales y sondajes diamantinos a una escala 1:500, donde se plasma el emplazamiento de la mineralización.

- **Modelamiento geológico tridimensional**

Con las secciones geológicas elaboradas se procede a efectuar el modelamiento geológico tridimensional en el software minero DataMine el cual es de gran ayuda para



definir la geometría y comprender el comportamiento de la estructura mineralizada en profundidad.

- **Análisis de data base**

El análisis de datos se realiza a los sondajes y canales que interceptan al sistema de vetas Vicente mediante estadígrafos tales como histogramas y gráficos de probabilidad plot logarítmicos que son útiles para identificar la presencia de poblaciones de leyes, así como también nos ayudan a identificar valores extremos (Outlier).

- **Estimación de recursos**

Una vez consolidada toda la información necesaria se procedió a realizar la estimación geoestadística de recursos por el interpolador kriging ordinario, considerando las leyes compositadas de cada sondaje y canal, utilizando los parámetros variográficos calculados y modelados para el sistema de vetas Vicente, calculando también la dirección de anisotropía y el alcance mínimo y máximo de estimación de leyes, teniendo en cuenta que no se presenten sesgos significativos en los resultados de leyes promedio, realizando las respectivas validación; para la categorización de los recursos se hace el uso del elipsoide de búsqueda con distancias definidas en el eje principal así como en el eje secundario y también una cantidad mínima y máxima de compósitos de muestras para realizar una adecuada categorización de recursos en medidos, indicados e inferidos de acuerdo con las normas y estándares que se encuentran establecidos en el código internacional JORC. y la norma NI 43-101.

El diagrama de flujo o también llamado flujograma de procesos representa la secuencia, pasos y procedimiento que se realizó en el presente trabajo de investigación para llevar a cabo la estimación de recursos minerales.

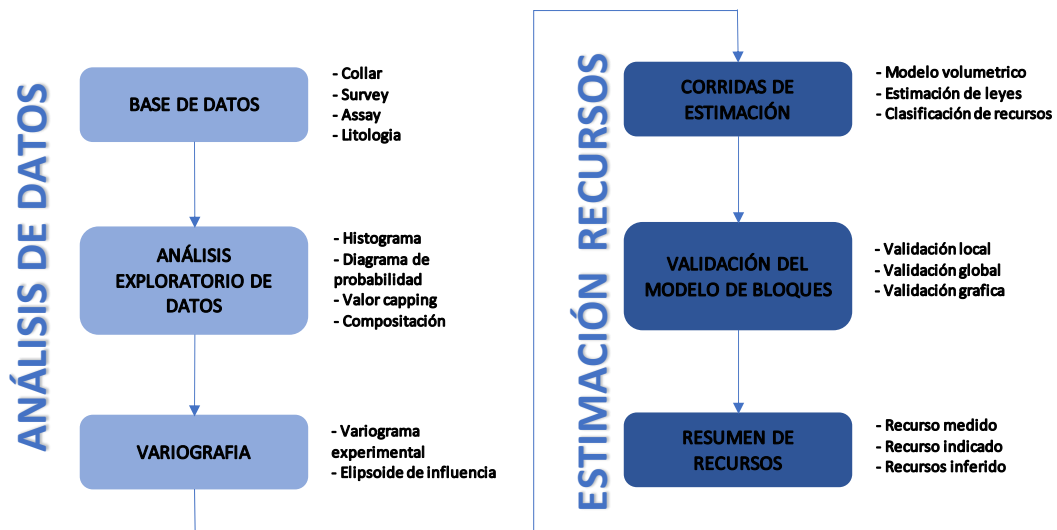


Figura 26: Diagrama de flujo de la estimación de recursos minerales.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Para llevar a cabo el trabajo de investigación se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Brújula tipo brunton
- Picota de geólogo
- Lupa bausch (10, 20X)
- GPS Marca Garmin
- Tablero de aluminio
- Lápiz de dureza
- Protactor
- Estuche de Colores
- Libreta de campo
- Cámara fotográfica
- Talonarios de muestreo
- Bolsas de muestreo, Bolsas plásticas 0,25mm 30×40 cm



- Planos topográficos: Escala 1/1000 y 1/500
- Mapas y perfiles geológicos: Escala 1/1000 y 1/500
- EPS: Zapatos con punta de acero, overol con cintas reflectivas, chaleco, guantes, lentes con lunas claras, protector de seguridad con portalampara, topones auditivos, respirador.
- Lámpara minera

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

La unidad minera San Rafael se encuentra ubicado en la cordillera oriental del Perú a una altitud de 4500 metros sobre el nivel del mar. Políticamente se encuentra en el Distrito de Antauta, Provincia de Melgar del Departamento de Puno, en las coordenadas UTM 8'426,570 N y 357,730 E, de la Hoja de Macusani N°29-V.

Tabla 5: Coordenada UTM del área de estudio.

COORDENADAS		ALTITUD m. s .n. m.	DATUM	ZONA
Este	Norte			
357,730	8'426,570	4500	WGS 84	19 S

La mina es accesible mediante dos vías (vía aérea-terrestre y vía aérea). La primera y más común es viajar en avión de Lima a Juliaca volando una hora y media, luego por vía terrestre a través de la carretera asfaltada Juliaca-Cusco, hasta la localidad de Calapuja, luego por la carretera asfaltada pasando por los pueblos Progreso y San Antón antes de llegar a Macusani hasta el desvío de Antauta y prosiguiendo hasta llegar al control de Garita en Cumani (centro poblado perteneciente a la unidad minera de San Rafael). 185 km demorando 3 horas y 30 minutos.

Tabla 6: Primera y más común vía de acceso a la unidad minera San Rafael.

Tramo	Distancia (Km)	Tiempo Prom. (Hrs)	Tipo de Vía
Lima - Juliaca		1.30	Aérea
Juliaca - Antauta	180	3.00	Asfaltado
Antauta - U. M. San Rafael	5	0.30	Trocha

La segunda es vuelo directo de Lima hasta el aeródromo San Rafael, tiempo de vuelo de 2 horas, luego por carretera en un viaje de 8 Km demorando 20 minutos hasta llegar a la mina.

Tabla 7: Segunda vía de acceso a la unidad minera San Rafael.

Tramo	Tiempo Prom. (Hrs)	Tipo de Vía
Lima - Aeródromo San Rafael	2	Aérea
Aeródromo San Rafael - U. M. San Rafael	0.2	Trocha

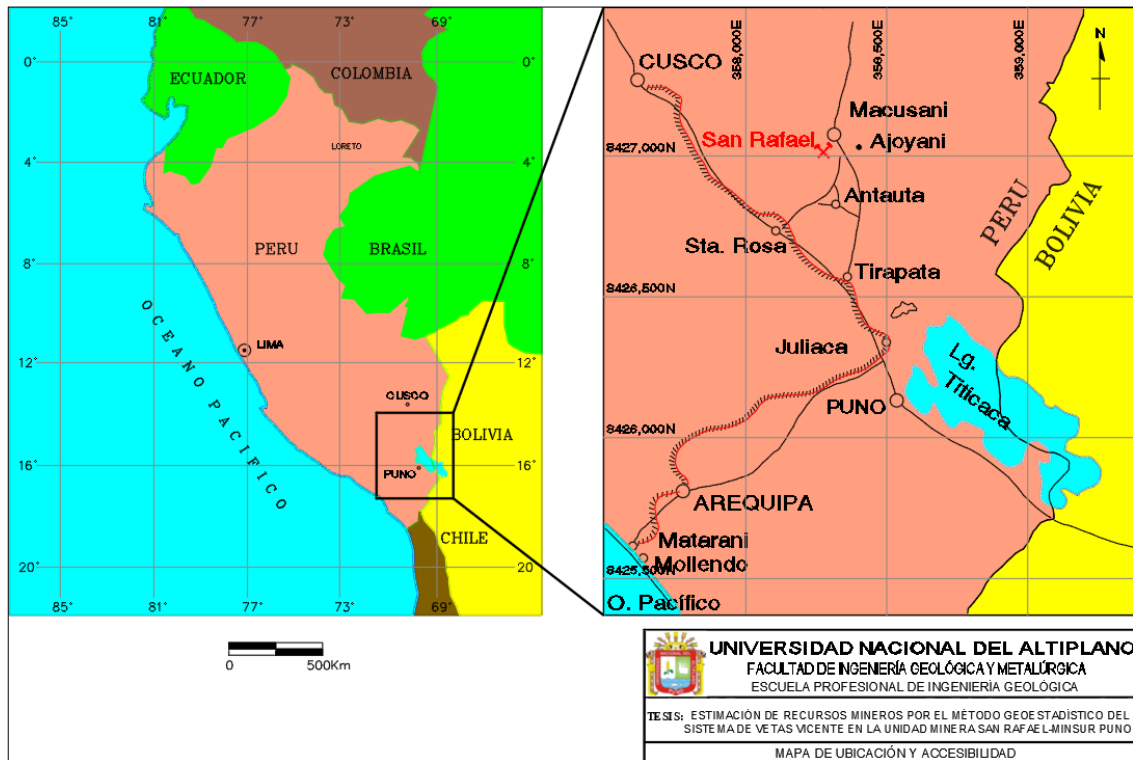


Figura 27: Mapa de ubicación geográfica de la unidad minera San Rafael.

4.2. CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima de la región es frígido con temperaturas que oscilan entre los 7°C a 13°C durante el día y durante la noche entre 0°C y -15°C. en la cual se presentan dos estaciones bien marcadas. La época de avenidas se presenta entre los meses de octubre y abril, siendo la precipitación en esos meses, el 89% de la precipitación total anual.

La temporada seca, se presenta entre los meses de mayo y septiembre, donde ocurren las heladas con temperaturas que varían de 2°C a -15°C contribuyendo con el 11% del total de la precipitación anual. La vegetación es escasa, la presencia del Ichu es



una característica importante ya que sirve como alimento para la crianza del ganado vacuno y auquénidos existentes en la zona. No hay agricultura debido al clima frígido.

4.3. GEOMORFOLOGÍA

El área cercana a la unidad minera presenta una configuración de puna, en la zona central del área delimitada se ubican las cumbres rocosas cubiertas parcialmente de nieve y que originan los valles glaciares con flancos colinosos. En la superficie se presentan depósitos recientes conformados por materiales glaciales, aluviales y coluviales.

De acuerdo con el mapa geológico del cuadrángulo de Macusani (Ingemmet, 1996), los alineamientos estructurales más cercanos están a 3,0 km aproximadamente, siguiendo una dirección NW-SE y WSW-ENE. Las primeras están asociadas probablemente al sistema de fallas inversas y normales, de rumbo NW-SE de mayor extensión. Otras estructuras representativas son pliegues sinclinales y anticlinales con eje de rumbo NE-SW que tiene como núcleo al Grupo Copacabana. A continuación, se describen los rasgos geomorfológicos más importantes de la zona de estudio.

4.3.1. Montaña Cordillerana

Se encuentra el nevado San Francisco de Quenamari y entre los cerros más altos destacan el Uscuyo y Condorquiña. El área se caracteriza por presentar un relieve montañoso agreste, con fuertes pendientes y en algunos casos picos pronunciados. Esta morfología ha sido configurada por la actividad glacial y forma parte de la cordillera oriental. Las montañas en la parte central de la zona de estudio están constituidas por rocas ígneas del Plutón de Quenamari, y rocas sedimentarias del Paleozoico inferior (Formación Sandía y Grupo Ambo) e intrusivos.

En la montaña cordillerana y el paso a las lomas se distinguen otras geoformas como: Circos glaciares, los cuales se localizan en la cabecera de los valles. Presentan



típica forma en “U”, con unas cabeceras empinadas, y cuenca de forma circular, separadas de los valles glaciares por umbrales. Se encuentran tapizados por depósitos morrénicos de tamaños muy heterogéneos con abundantes bofedales y pequeñas lagunas. Por su naturaleza están asociados a nevados, como el de Quenamari.

Las lagunas en la zona de estudio tienen una configuración escalonada y se emplazan mayormente en la montaña cordillerana entre los 4,800, 4,700, y 4,500 msnm, respectivamente; sus aguas provienen generalmente de la precipitación, así como de los deshielos del nevado Quenamari y de la nieve acumulada de manera periódica. Estas lagunas conforman la cabecera de las quebradas Chogñacota, Chuquisani y Vilacota. Las lagunas principales son Suytocochoa, Estancocochoa y Chogñacota; habiendo sido represadas las dos primeras.

4.3.2. Lomas

Destacan nítidamente al sur del nevado Quenamari, marcando un cambio de relieve moderado a suave con respecto al relieve cordillerano, conformando el paso a las peniplanicies andinas. Se observan pequeñas elevaciones de terreno, con perfiles moderados, convexos y bordes alargados y redondeados; siendo el producto del aplanamiento del terreno por acción glacial debido a intensos procesos de erosión y deposición. Presentan desniveles entre el fondo de quebrada y la cresta de 70 a 100 m. Estas zonas están constituidas mayormente por depósitos morrénicos y glaciofluviales.

4.3.3. Valles Glaciares

Esta morfología predomina en el curso medio a inferior de las quebradas que disectan el área de estudio, que presentan una orientación predominante N-S hasta su confluencia con el río Antauta. Constituyen el nexo entre los nevados y los cursos medios y peniplanicies aluviales. Presentan una sección típica en “U”, con un fondo curvo o casi



planar, de pendiente suave, con laderas de moderada altura, de bordes alargados y redondeados, y desniveles entre la cima y el fondo del valle de 80 a 100 m. Las quebradas son amplias en su cabecera y se va estrechando hacia aguas abajo. Es común encontrar depósitos morrénicos y glaciofluviales en sus flancos y fondo de cauce.

4.3.4. Valles Fluviales

Se caracterizan por su sección transversal en “V”, con pendientes moderadas, emplazadas en un fondo plano rellenado por depósitos fluviales no consolidados, limos, arenas y gravas, con cantos rodados. Las terrazas fluviales están poco desarrolladas y generalmente asimétricas. En el área de estudio el valle de interés es tributario del río Antauta.

4.3.5. Ladera Cordillerana

Presenta pendientes no muy fuertes, con perfiles asimétricos y está dividido por quebradas profundas. En general, forma un nexo entre la montaña cordillerana con las lomas y la peniplanicie andina. Pueden presentar crestas pronunciadas y cambios bruscos de relieve.

4.3.6. Colinas Intracordilleranas

Se presentan hacia el sector oeste y sur, fuera del área de estudio. Conforman colinas altas que se elevan progresivamente de las planicies centrales. Litológicamente consisten en rocas del Paleozoico superior.

4.4. GEOLOGÍA LOCAL

Durante la realización de los trabajos de campo, se pudo reconocer lo siguiente: Las filitas, pizarras y cuarcitas de la Formación Sandia han sido intruidas por dos stocks graníticos terciarios. La descripción de las unidades litológicas, depósitos no consolidados y materiales antrópicos se detalla a continuación:



4.4.1. Formación Sandia (O-s)

Afloran en los alrededores del campamento de San Rafael y en la laguna Chogñacota sobre el yacimiento mineral. Formación litológica principalmente constituida por pizarras y filitas de color gris oscuro con muscovita en los planos de foliación. Estas rocas en contacto con el intrusivo fueron metamorfizados a hornfels de color gris oscuro-marrón. Por otro lado, en menor magnitud se muestran estratos de cuarcitas intercaladas con filitas.

Las cuarcitas son expuestas al oeste del nevado de Quenamari, en la parte sur de la laguna Chogñacota, afloran sobre las pizarras en forma de pequeños afloramientos. Son duras, de grano fino y de color blanquecino con tonos grises a gris verdoso en fractura fresca. Hornfels, pizarras que sufrieron metamorfismo, en contacto con el intrusivo; son de color gris oscuro a marrón con presencia de pequeños cristales brillantes de mica negra.

4.4.2. Grupo Ambo (Ci-a)

El Grupo Ambo presenta en la base una intercalación monótona de limoarcillas con niveles aislados de areniscas. Las limoarcillitas contienen micas y se presentan laminadas en estratos de más de 1 m de espesor. Las areniscas son de color gris blanquecinas a gris y beige; grano fino, cuarzosas, con laminación pronunciada y en capas de 10 a 30 cm. Asimismo, la secuencia superior presenta areniscas cuarzosas de grano medio a fino, gris blanquecino a beige y con niveles de limoarcillitas laminares. Afloramientos de esta unidad litológica se muestra al noreste de la mina San Rafael y al sur aflora en las quebradas Chogñacota, Caquene, Chuquisani y a lo largo del río Antauta.

4.4.3. Depósitos Cuaternario Aluvial/Morrena (Q-al)

Son depósitos que se encuentran en las quebradas ubicadas en la parte Norte y Sur de San Rafael. Estos depósitos se encuentran rellenando los valles glaciares antiguos, por



encima de los 4,200 m. s. n. m., están constituidas por brechas de composición variada englobadas en una matriz arenosa.

4.4.4. Rocas Intrusivas

Formado por un cuerpo monzogranítico del Oligoceno Superior - Mioceno Inferior que intruyó a la Formación Sandia ocasionándole grandes sistemas de fracturas. La erosión ha dejado al descubierto dos stocks en el nevado Quenamari: uno en el nevado San Bartolomé de la mina San Rafael y el otro en el nevado San Francisco de la mina Quenamari, de los cuales salen varios diques. El eje mayor del intrusivo de San Rafael tiene un rumbo NE-SW, una longitud de 1000 m. y anchos de 300 m. a 800 m. En profundidad el ancho es de 2000 m., donde los contactos tienden a juntarse. El intrusivo de la mina Quenamari tiene una forma circular de aproximadamente 1000 m. de diámetro, las labores subterráneas muestran un alargamiento al SE. El afloramiento de este intrusivo es discontinuo, porque está cubierto parcialmente por las cuarcitas de la Formación Sandia.

Una cortada en el nivel 4200 entre las minas San Rafael y Quenamari muestra que los dos intrusivos tienden a ser un mismo cuerpo con un eje mayor NE-SW de 5000 m. de longitud. El contacto SW de este cuerpo estaría en las cercanías del dique semianular, mientras que el contacto noreste está en la veta Nazareth. El intrusivo es un monzogranito peraluminoso con fenocristales de feldespatos alcalinos euhedrales de hasta 12cm. de longitud y con maclas de Carlsbad, biotita, cordierita y micro fenocristales de sillimanita.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES	Grosor (m)	COLUMNA	DESCRIPCION
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	Depositos aluviales	800		Arenas gravas y limoarcillitas Gravas y arenas de clastos polimicticos Gravas dubredoendadas en matriz areno-limosa
		Pleistoceno	Depositos Morrenicos			
PALEOZOICA	Carbonifero	Inferior	Grupo Ambo	800		Areniscas cuarzosas blancas y grisáceas con intercalaciones de limarcillitas negras carbonosas y limoarcillitas violáceas. Algunos niveles de areniscas con estratificacion sesgada <small>Disc. Angular</small>
	Ordovicio		Formación Sandia			Areniscas cuarzosas gris clara en capas delgadas con debil laminacion cruzada, Lutitas gris oscura laminadas, Pizarras, areniscas cuarzosas de grano fino, duro Lutitas y limonitas gris oscuras a negras.

Figura 28: Columna estratigráfica local (San Rafael).

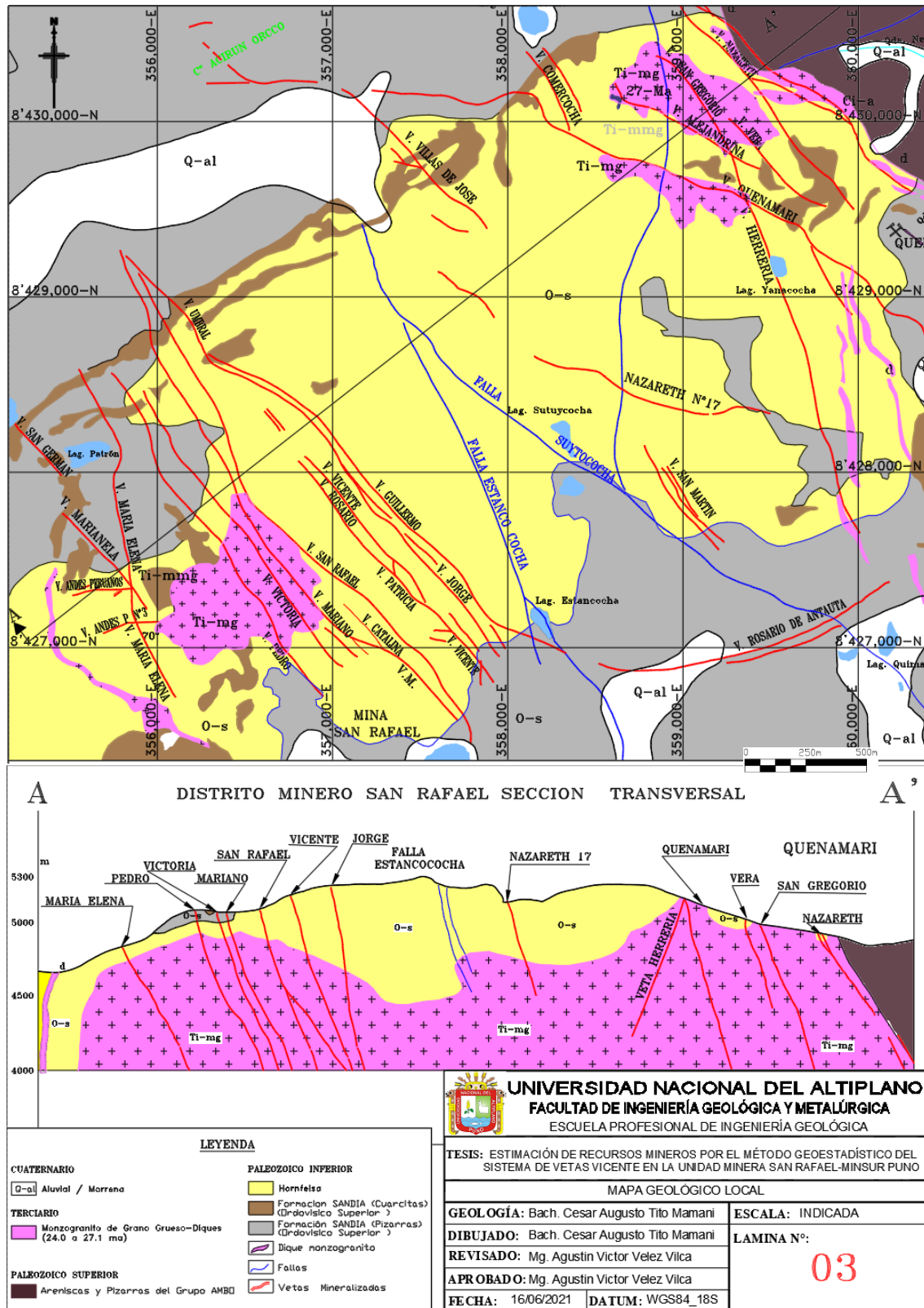


Figura 29: Mapa geológico local (Minsur).



4.4.5. Yacimiento mineral

La mina San Rafael se ubica en la subprovincia metalogénica de la faja estañífera de Bolivia, en los Andes Centrales, con cobre en la parte superior y estaño en profundidad; además, una mineralización polimetálica de plomo-zinc-plata-cobre-estaño hacia los bordes o extremos de este distrito minero.

La mineralización es de origen hidrotermal en vetas de relleno, de reemplazamiento de fracturas y cuerpos de mineral en el monzogranito y en los metasedimentos. La zona mineralizada de este distrito minero abarca una extensión de 5.0 km por 7.5 km, en donde se encuentran las minas San Rafael y Quenamari. La veta San Rafael es la principal estructura que presenta una longitud de 3 km. y una profundidad conocida de aproximadamente de 1.2 km por debajo de la superficie. Sin embargo, no toda la veta contiene mineral recuperable (de valor económico) y de manera considerable la mayor concentración de estaño yace entre los niveles 4,600 y 4,000.

4.4.6. Geología Estructural

La zona de estudio estructuralmente corresponde a la mayor deformación por tener rocas paleozoicas, cuyo sistema principal de fallamiento posee generalmente un rumbo andino NW-SE, encontrándose desplazadas por fallas transversales de rumbo NE-SW. La segunda corresponde a la respuesta del primer sistema de fallamiento. El comportamiento de las fallas ha estado controlado por la litología componente del macizo. Al mismo tiempo como geoestructuras se muestra una secuencia de vetas paralelamente distribuidas a lo largo del nevado de San Bartolomé de Quenamari dentro del Stock monzogranítico y la formación Sandía, encontrándose dentro de esta la veta San Rafael y el sistema de vetas Vicente rica en contenido en estaño.

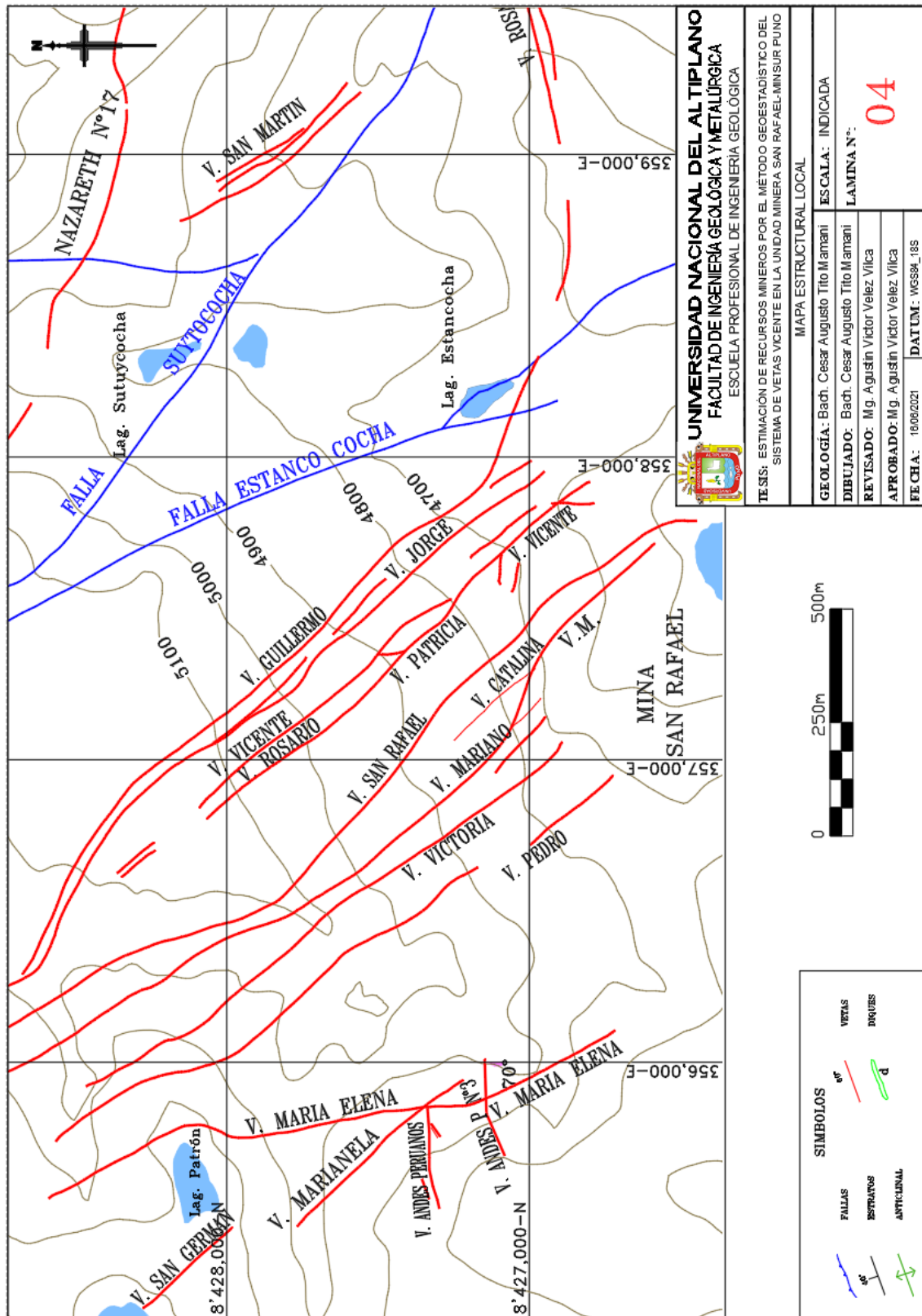


Figura 30: Mapa estructural local (Minsur).



4.4.6.1. Controles estructurales del sistema de vetas Vicente

Estructuralmente en la mina San Rafael se aprecian dos fallas cercanas siendo esta la falla Estancococha y la falla Suytococha, estando estas dentro del nevado de San Bartolomé de Quenamari, teniendo direcciones NW-SE. Las vetas de la mina San Rafael rellenan fallas preminerales del sistema andino NW-SE, las cuales tuvieron movimiento normal con una fuerte componente horizontal al norte y son desplazadas por fallas postminerales de rumbo NE-SW. Las vetas son más definidas en el intrusivo, en tanto que en los metasedimentos son irregulares y discontinuas. Generalizando, las vetas de la mina San Rafael tanto en superficie y en interior mina presentan un rumbo general NW-SE (330°) con un buzamiento al NE

4.4.7. Vetas y cuerpos

El sistema de vetas Vicente conta de 4 estructuras conformado por una serie de vetas y cuerpos que se detallan a continuación:

4.4.7.1. Vicente Piso

La veta Vicente Piso se encuentra ubicado al Este de la veta San Rafael, reconocido entre los niveles 4200 al 3650 en vertical con rumbo NW – SE, y buzamiento que varía entre 50° a 83° al NE.

La veta Vicente Piso es una brecha con matriz de cuarzo, el cual se ha emplazado al mismo tiempo que el cuarzo de la veta Vicente Techo. Los clastos de la brecha son de intrusivos con presencia de casiterita. Es evidente que hubo venillas de casiterita en el intrusivo, las cuales fueron brechadas posteriormente y rellenas con cuarzo blanco.

La veta Vicente Piso presenta un ensamble mineralógico de clorita, sílice, cuarzo; casiterita cristalizada en venillas y diseminada, tiene presencia de sulfuros (pirita,



calcopirita, arsenopirita, pirrotita), su textura es brechada y el intrusivo monzogranito presenta una insipiente cloritización.

Estructuralmente la veta Vicente Piso forma parte del sistema Vicente, ubicándose al piso de dicho sistema. La mineralización de estaño de la veta Vicente Piso no corresponde al mismo evento de la veta Vicente Techo, sino corresponde a un sistema de vetillas independiente, paralela a la veta San Rafael.

4.4.7.2. Vicente Centro

La veta Vicente Centro se encuentra ubicada entre la veta Vicente Piso y Vicente Techo, reconocida entre los niveles 3800 al 3550 en vertical con rumbo NW – SE, y buzamiento que varía entre 80° al NE a 85° al SW.

La veta Vicente Centro presenta un ensamble de clorita, sílice, cuarzo; casiterita cristalizada en venillas y diseminada, tiene presencia de sulfuros diseminados y en parches (pirita, calcopirita), su textura es tipo stockwork y el intrusivo monzogranito es fresco. Estructuralmente la veta Vicente Centro está constituido por dos ramales subparalelos, que se desprenden de la veta Vicente Techo. En la parte superior, esta veta está controlado por la veta Vicente Techo

4.4.7.3. Vicente Ramal Piso

La veta Ramal Piso Vicente se encuentra ubicada al Oeste del sistema Vicente y al piso de la veta Vicente Piso, reconocida entre los niveles 3975 al 3700 en vertical con rumbo NW – SE, y buzamiento que varía entre 70° al NE.

La veta Vicente Ramal Piso presenta un ensamble de clorita, sílice, cuarzo; casiterita en venillas, tiene presencia de sulfuros (pirita, calcopirita), su textura es brechada y el intrusivo monzogranito presenta una leve cloritización. Estructuralmente la



veta Ramal Piso Vicente se desprende de la veta Vicente Piso. En la parte superior, esta veta está controlada por la veta Vicente Piso.

4.4.7.4. Vicente Centro Piso

El cuerpo Vicente Centro Piso se encuentra ubicado entre las vetas Vicente Piso y Vicente Centro, reconocido entre los niveles 3800 al 3700 en vertical con rumbo NW – SE, y buzamiento que varía entre 30° a 70° al SW.

El cuerpo Vicente Centro Piso presenta un ensamble de clorita, sílice, cuarzo; casiterita cristalizada en venillas, tiene presencia de sulfuros diseminados (pirita, calcopirita), su textura es tipo stockwork y el intrusivo monzogranito es fresco. Estructuralmente el cuerpo Vicente Centro Piso está constituido por un sistema de vetas y vetillas entrecruzadas tipo stockwork, controladas al piso y techo por los cuerpos Vicente Piso y Vicente Centro, respectivamente.

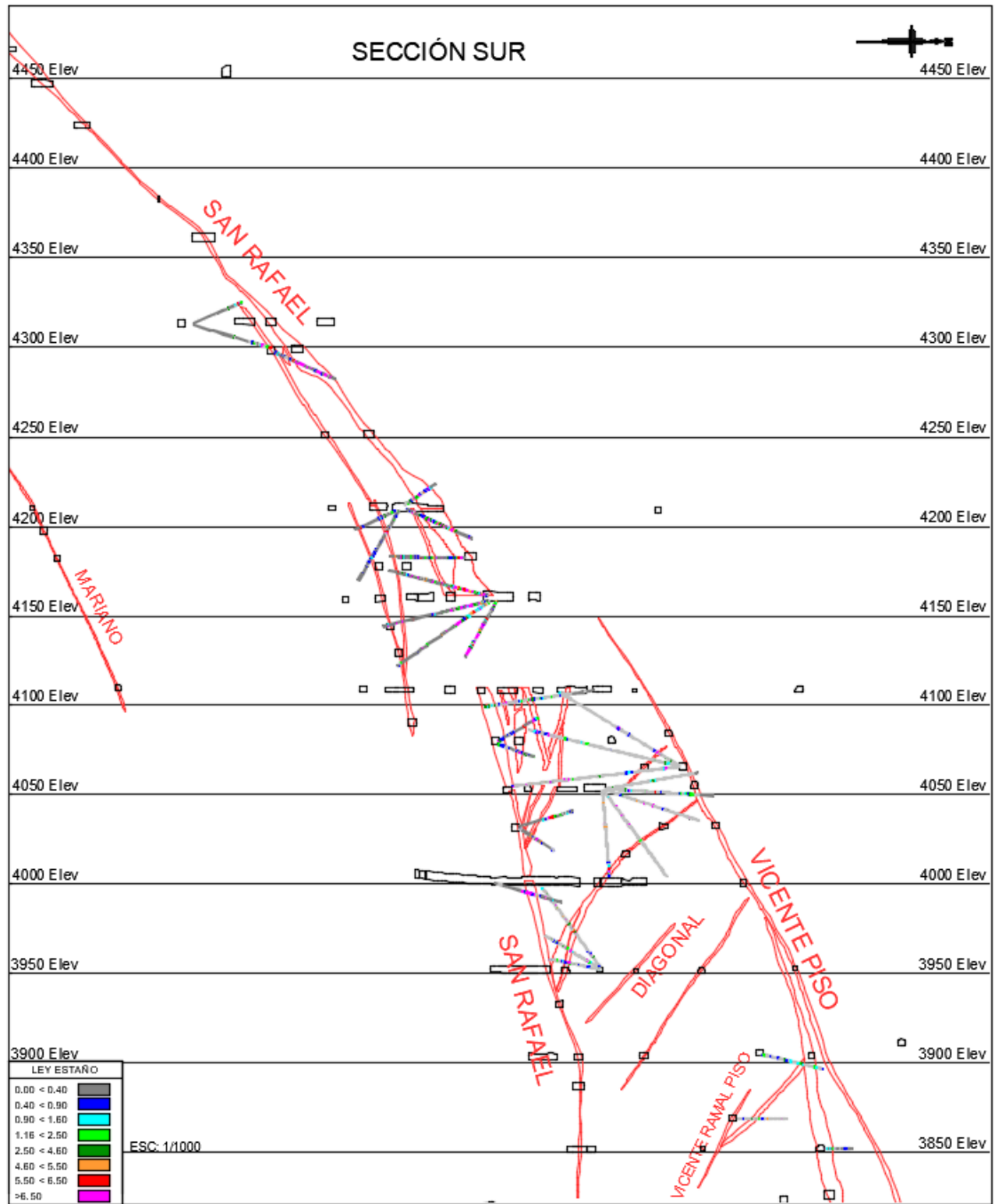


Figura 31: Sondajes diamantino que cortan la veta San Rafael y Vicente

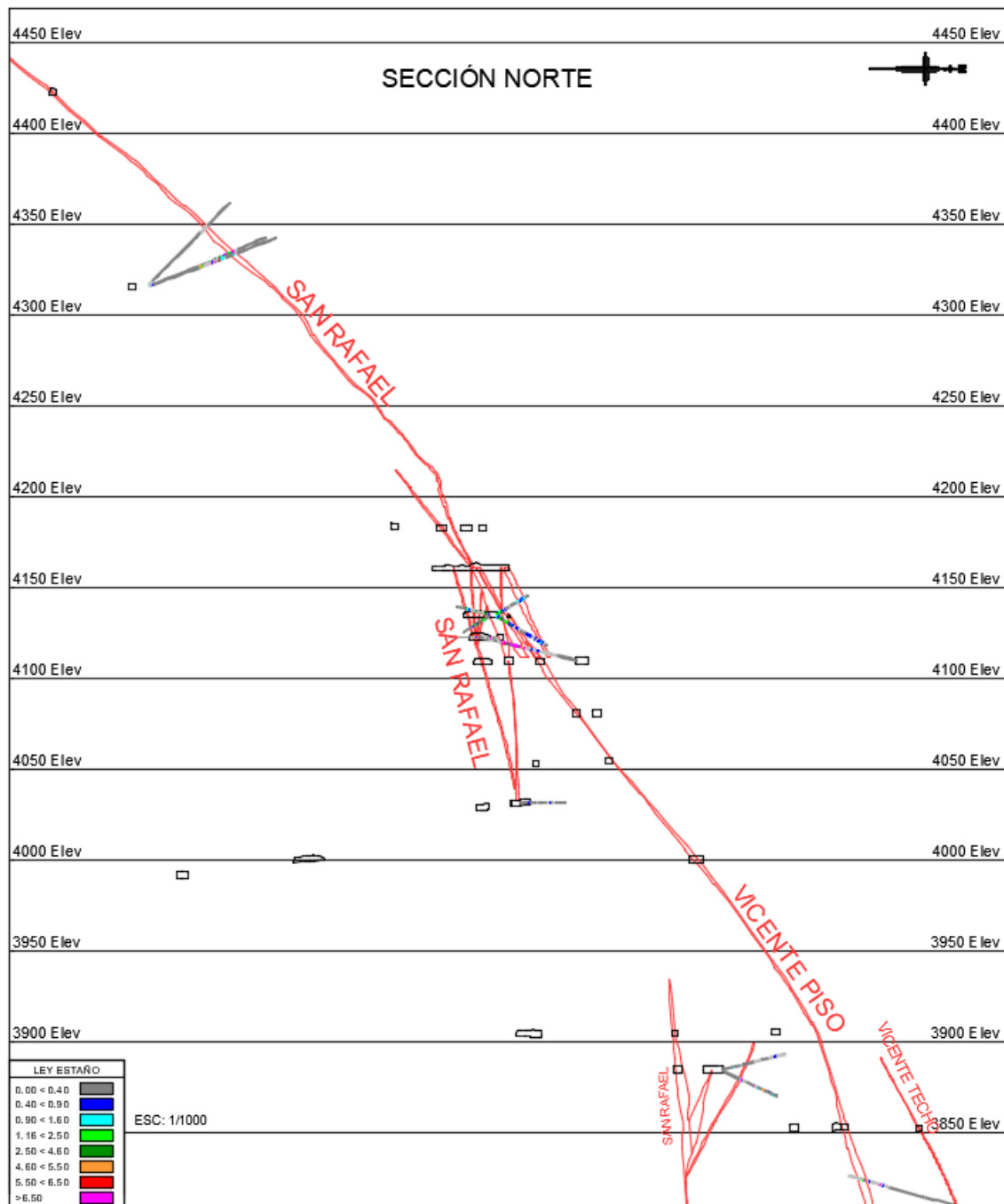


Figura 32: Veta San Rafael y Vicente

4.4.8. Alteración Hidrotermal

a) Turmalina-Clorita-Casiterita

Representa la primera etapa de alteración. La turmalina está en la matriz o reemplazando al feldespatos alcalino, la biotita está alterada a clorita en varios grados. La casiterita está presente en varias cantidades



b) Feldespato Alcalino

Los granos intensamente alterados son feldespatos potásicos anteriores, la alteración consiste en granos finos de moscovita, en algunos granos el reemplazo parece ser más agresivo desarrollando granos más grandes en comparación con otros sectores.

c) Sericita

Conocida también como alteración filica. ocurre por la lixiviación de Na, Ca, Mg. Esta alteración ocurre en rocas de composición acida intermedia reemplazando feldespatos, plagioclasas y biotitas. La sericita se encuentra formando venillas y su asociación característica es: cuarzo-sericita-pirita.

El zonamiento está marcado por tres zonas bien diferenciadas, con importante presencia de cobre en la parte superior y estaño en profundidad, pasando por una zona mixta (entre los niveles 4668 a 4770). Además, una mineralización polimetálica de plomo-zinc-plata-cobre-estaño hacia los bordes o extremos del yacimiento.

4.4.9. Mineralización y paragénesis

Cuatro etapas de mineralización se describen en San Rafael.

Primera Etapa.- El metamorfismo alcalino fue acompañado por vetas de cuarzo-turmalina-arsenopirita sin casiterita, las inclusiones fluidas de estas vetas son calientes 525 °C y salinas.

Segunda Etapa.- Cuarzo-clorita-casiterita botroidal estaño madera (Wood tin), está indicando la super saturación y rápida deposición de estaño, el pórfido monzogranito intensamente cloritizado es reemplazado por la casiterita, en espacios abiertos rellenos con granos angulosos de cuarzo, la alteración se extiende solo de decenas de centímetros a pocos metros, las inclusiones fluidas indican que los fluidos fueron fríos (entre 200 –

425 °C) apuntando a moderadamente salinas, (0-27% Na Cl equivalente en peso) y no presenta evidencia de ebullición, la alteración de roca caja consiste en una fuerte cloritización y silicificación extendida desde menos de un metro a menos de 5m. en las cajas.

Tercera Etapa.- Consiste en cuarzo–clorita–calcopirita–esfalerita–galena–casiterita acicular (needle tin), la casiterita ocurre como finas agujas, menor cantidad de pirita, arsenopirita, pirrotita, estannita y bismuto nativo, la fluorita y la adularia también ha sido notada. La alteración de las cajas fue menor limitada a cloritización más o menos silicificación a lo largo de las fracturas. La temperatura de homogenización de las inclusiones fluidas varía de 210° - 420°C y la salinidad entre 5 a 18% de Na Cl equivalente en peso.

Cuarta Etapa.- Vetas de Cuarzo – Calcita con solo trazas de calcopirita y alteración cloritica, son post-mineral; sus fluidos fueron fríos 190 – 290°C y salinidades entre 1% y 5% de Na Cl equivalente en peso.

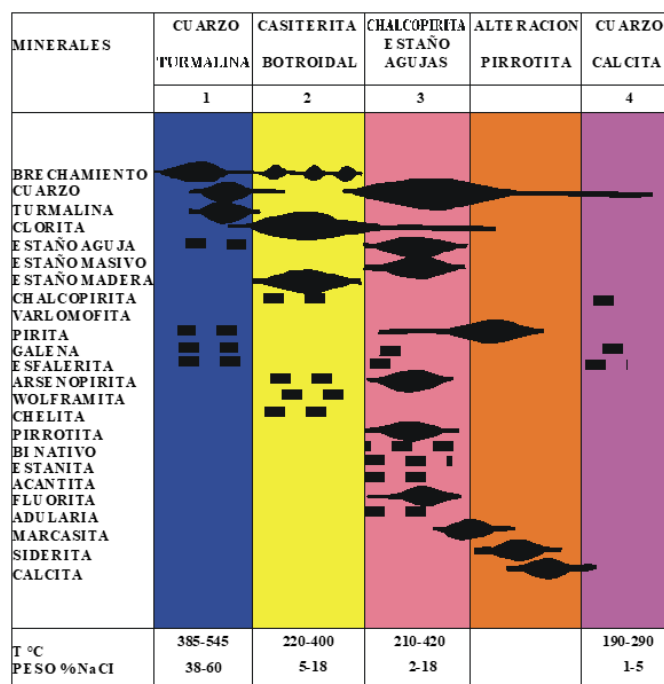


Figura 33: Etapas de mineralización (Palma, 1981).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DE RECURSOS MINERALES

5.1.1. Generación del modelo geológico tridimensional

El modelo geológico tiene por finalidad de definir los límites de la mineralización del yacimiento. Para la realización del modelo geológico, se elaboraron secciones geológicas perpendiculares al rumbo de la veta a una distancia de 12 metros entre cada sección donde se realiza el reconocimiento tanto del piso como del techo de las estructuras mineralizadas, también se realiza la interpretación geológica en planos en planta teniendo como base planos geológicos de las galerías y subniveles cartografiados que cuenten también con leyes de muestreo de canales, por último se realiza interpretaciones geológicas en eje de sondajes diamantinos esto con el fin de tener la mayor información posible para la generación del modelo geológico.

Con la información de las interpretaciones geológicas en secciones transversales, planos en planta y sondajes diamantinos nos permiten trazar el límite del cuerpo mineralizado, el método para la generación del modelo tridimensional es el método de los perfiles. los modelos geológicos son considerados como fronteras y/o límites firmes lo cual ayuda a prevenir parcialización o preferencias en la estimación de recursos ante otras estructuras.

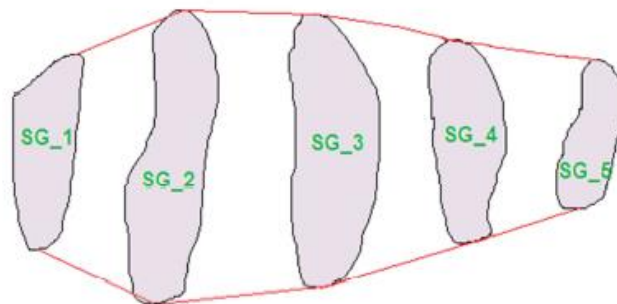


Figura 34: Generación del sólido 3-D por el método de los perfiles.



5.1.2. Base de datos del área en estudio

Una base de datos permite almacenar gran número de información de una forma organizada y sencilla para su consulta, realización de búsquedas, nuevos ingresos de datos, etc. Todo esto lo permite realizar de una forma rápida y simple desde un ordenador.

La base de datos constituye la base necesaria para la estimación de Recursos Minerales (establecido por la recolección, verificación, registro, almacenamiento y procesamiento de los datos). El establecimiento de un programa QA/QC, esencial durante este proceso.

Los componentes de una base de datos de recursos es la siguiente:

- **Collar**

Se define por las coordenadas de inicio del sondaje diamantino y/o canal, constituye un archivo Excel que contiene las coordenadas este, norte y altitud (cota).

- **Survey**

Es la medición del azimut y buzamiento que va tomando el sondaje a lo largo del mismo, puede ser por levantamiento topográfico o medición réflex.

- **Assay**

Contiene la información de ensayos de leyes tomadas de las muestras de canales y sondajes diamantinos; reportados por laboratorio químico.

- **Litología**

Contiene el tipo de litología que atraviesa el sondaje diamantino en su recorrido, también se puede identificar otras características geológicas como son: alteración texturas etc.

Con la información contenida en estas tablas se procede a generar los sondajes y canales de muestreo en 3-D en el software DataMine, que serán necesarios para llevar a cabo de estimación geoestadística de recursos.

5.1.3. Selección de datos

La data empleada en la estimación de recursos son canales y sondajes de perforación, son seleccionados al interior de los modelos de las estructuras (sólidos 3-D), cada una de las estructuras mineralizadas del sistema de vetas Vicente posee su sólido interpretado geológicamente y modelado que actúan como limitantes duras y que al ser hastiales de la veta (caja piso y caja techo) separan la zona económica de las rocas encajonantes sin valor económico.

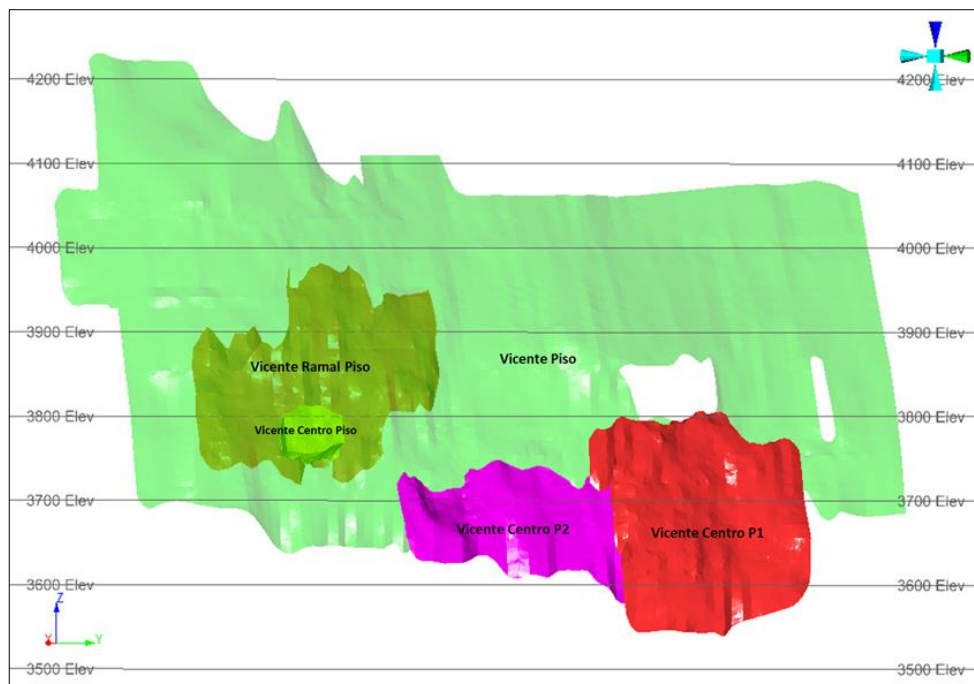


Figura 35: Vista tridimensional de los sólidos del sistema de vetas Vicente.

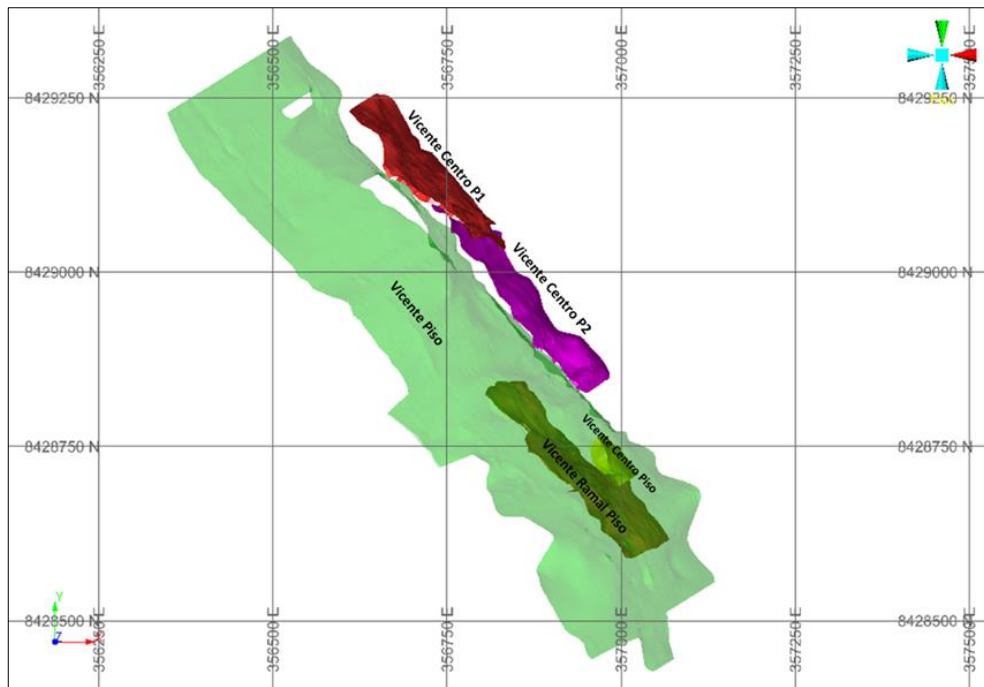


Figura 36: Vista en planta de los sólidos del sistema de vetas Vicente

Tabla 8: Cantidad de data empleada por estructura.

Zona	Canales	Drill Holes	Total
Vicente Piso	975	351	1,326
Vicente Centro Principal 1	682	154	836
Vicente Centro Principal 2	213	114	327
Vicente Ramal Piso	574	104	678
Vicente Centro Piso	41	44	85

5.1.4. Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos es un conjunto de técnicas y herramientas aplicadas a la data inicial; para que luego de un proceso de análisis estadístico obtener una data que sea lo más confiable y representativa posible del yacimiento.

5.1.4.1. Histogramas y diagramas de probabilidad

Los estadígrafos utilizados para el análisis geoestadístico de datos son los histogramas y los gráficos de probabilidad logarítmico, las cuales nos muestran la totalidad de muestras empleadas por cada estructura a estimar; también nos muestran los

límites de detección reportados por el laboratorio químico, leyes mínimas y máximas. Es una herramienta útil para detectar valores alto o outliers las cuales no parecen pertenecer a la misma población de datos; si los hubiera serán bajados a un máximo razonable (capping). De acuerdo con el análisis estadístico las poblaciones de datos presentan una distribución log normal las cuales serán empleados para identificar los parámetros capping.

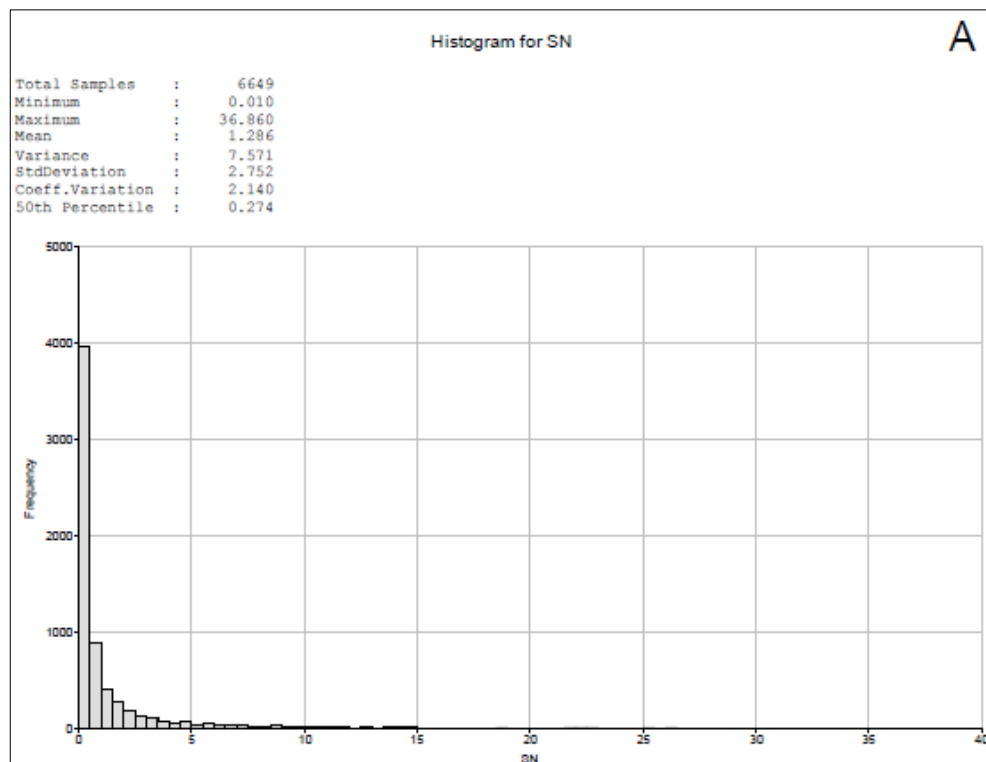


Figura 37: Veta Vicente Piso. A). Poblacion de datos sesgada hacia la derecha, con una media de 1.296 y leyes mayores al 30 %Sn.

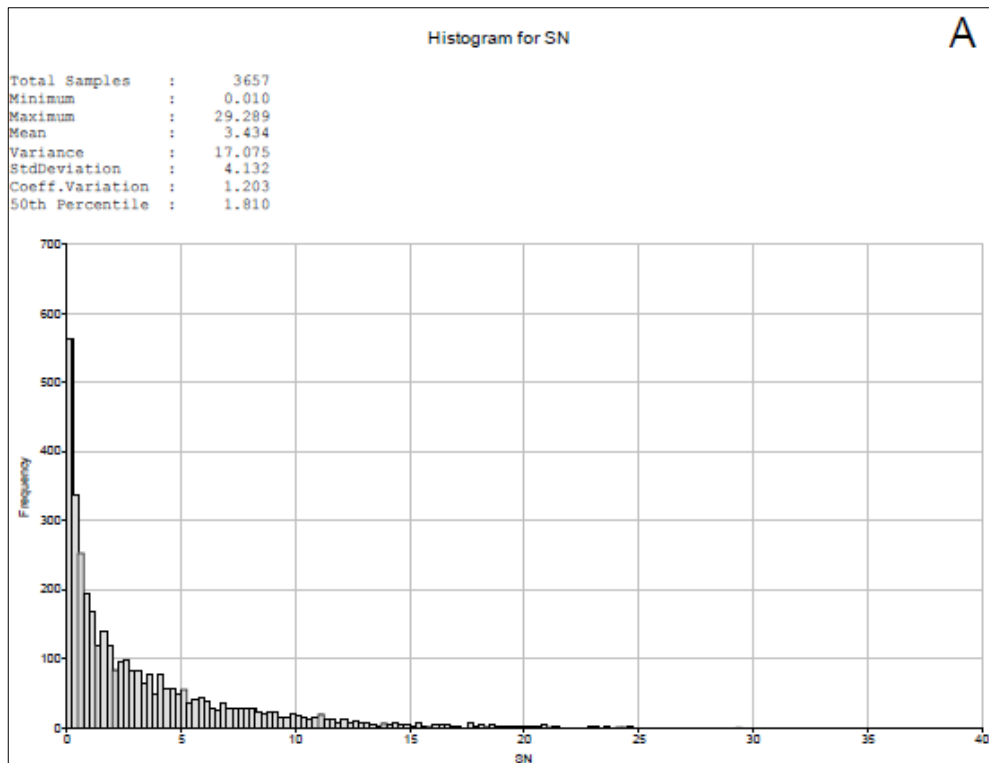


Figura 38: Veta Vicente Centro P1. A). Distribución asimétrica positiva y valores altos que van del rango de 20 a 25 %Sn.

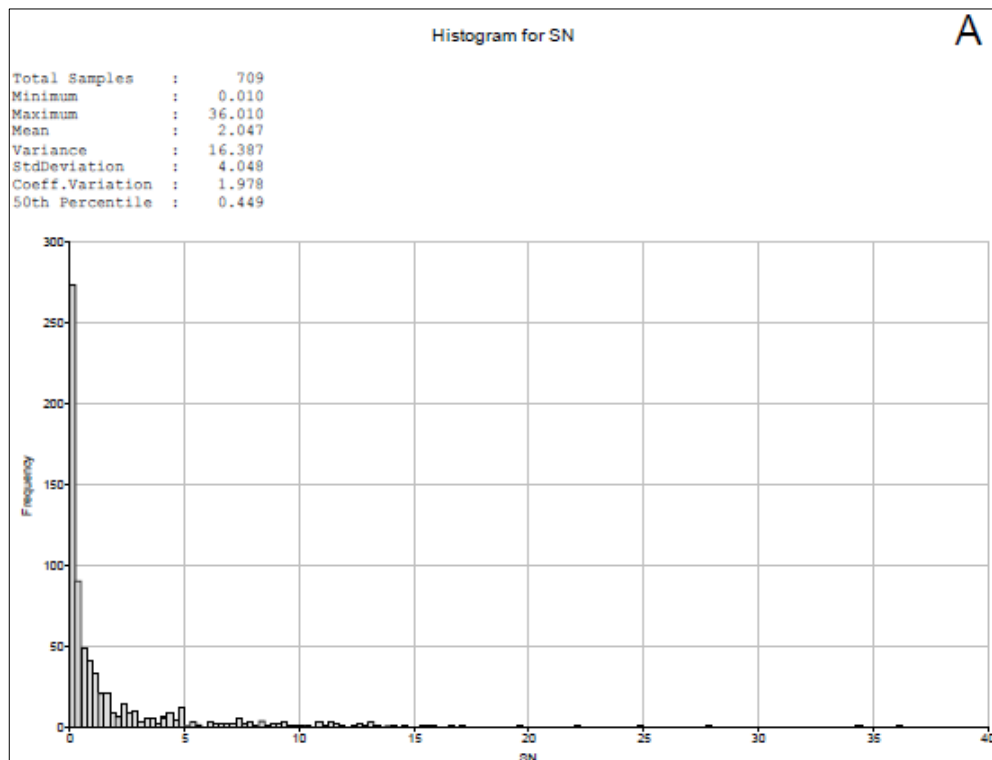


Figura 39: Veta Vicente Centro P2. A). Datos dispersos que no parecen pertenecer a la población (Outliers).

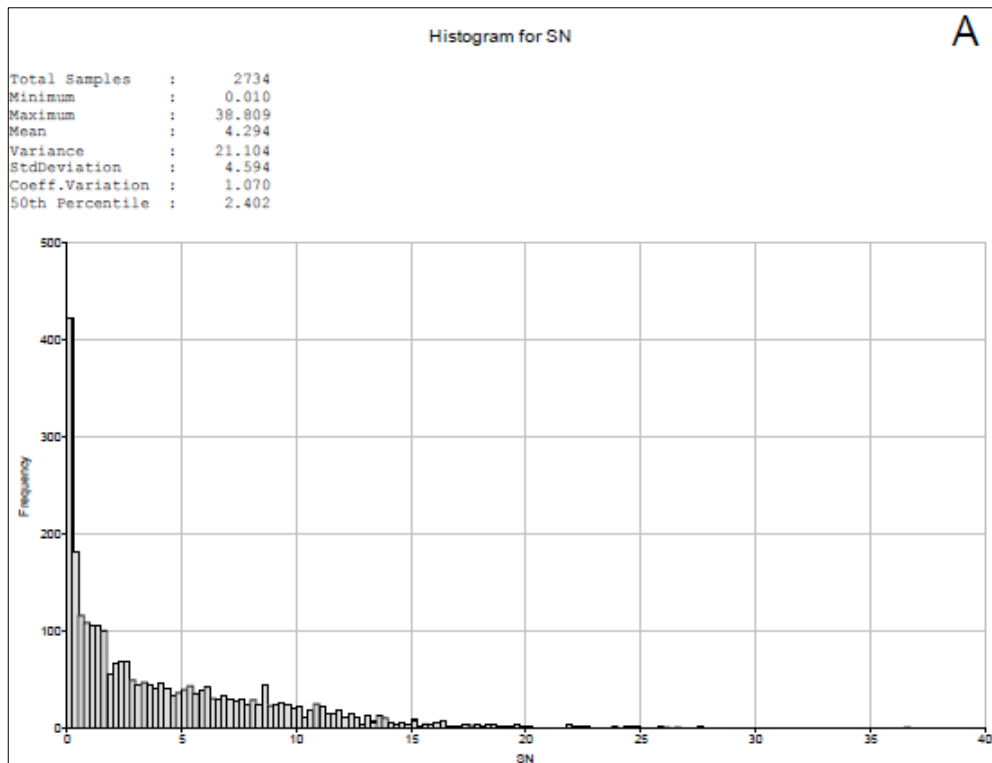


Figura 40: Veta Vicente Ramal Piso. A). La mayor frecuencia de datos se encuentra entre 0 y 0.50, teniendo una media poblacional de 4.294.

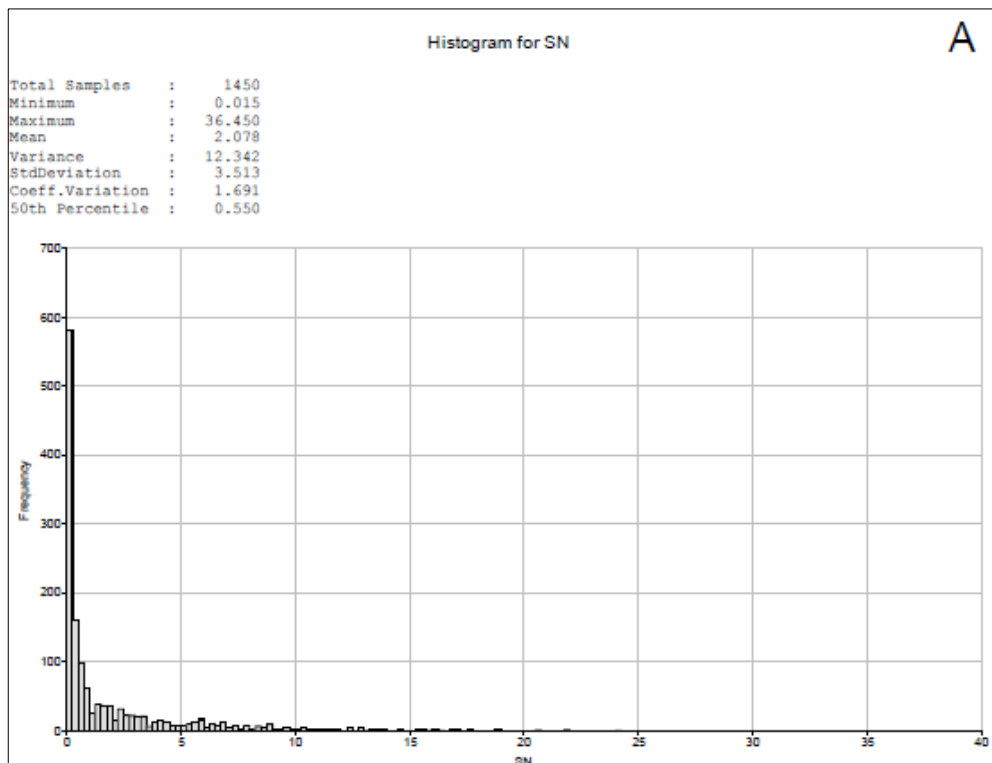


Figura 41: Veta Vicente Centro Piso. A). La mayor frecuencia de datos se encuentra entre 0 y 0.50, Se tienen leyes mayores al 35 %Sn.

De los estadígrafos generados se observa que la data de cada una de las estructuras que conforman el sistema de vetas Vicente presenta valores extremos (Outliers), las cuales si no se le da un análisis y tratamiento especial podrían afectar considerablemente la estimación de recursos generando una sobreestimación de las leyes de estaño.

La elección del umbral (capping) que permitirá bajar las leyes altas se hizo con el estadígrafo log probability plot; la cual representa mejor la distribución de las leyes, la cantidad de muestras a la cual se le aplica el capeo no debe ser mayor al 5% del total de muestras con la finalidad de no tener un impacto significativo en la disminución de la data inicial.

5.1.4.2. Distribución de ley del sistema de vetas Vicente

La tabla 9 resume las estadísticas básicas de la data inicial de cada una de las estructuras modeladas del sistema de vetas Vicente, se observa que la zona Vicente Ramal Piso contiene los más altos valores de estaño; en tanto que las zonas de Vicente Centro Principal 1, Vicente Centro Principal 2, Vicente Centro Piso contienen valores moderadamente altas y la zona Vicente Piso contiene el valor más bajo de estaño como también esta zona contiene la mayor cantidad de datos en comparación con las demás zonas en estudio.

Tabla 9: Estadística de la data inicial.

ZONA	NSAMPLES	MINIMUM	MAXIMUM	MEAN	VARIANCE	STANDDEV	COEFF.VARIATION
Vicente Piso	6,649	0.010	36.860	1.286	7.571	2.752	2.140
Vicente Centro Principal 1	3,657	0.010	29.289	3.434	17.075	4.132	1.203
Vicente Centro Principal 2	709	0.010	36.010	2.047	16.387	4.048	1.978
Vicente Ramal Piso	2,734	0.010	38.809	4.294	21.104	4.594	1.070
Vicente Centro Piso	1,450	0.015	36.450	2.078	12.342	3.513	1.691

5.1.4.3. Determinación del valor capping

La determinación de valor capping se realiza gráficamente teniendo como base el grafico de probabilidad; en la cual se realiza el corte de los valores altos en algún punto

de inflexión o cambio de pendiente de la curva, una vez encontrado está pendiente los datos mayores son normalizados a un máximo razonable.

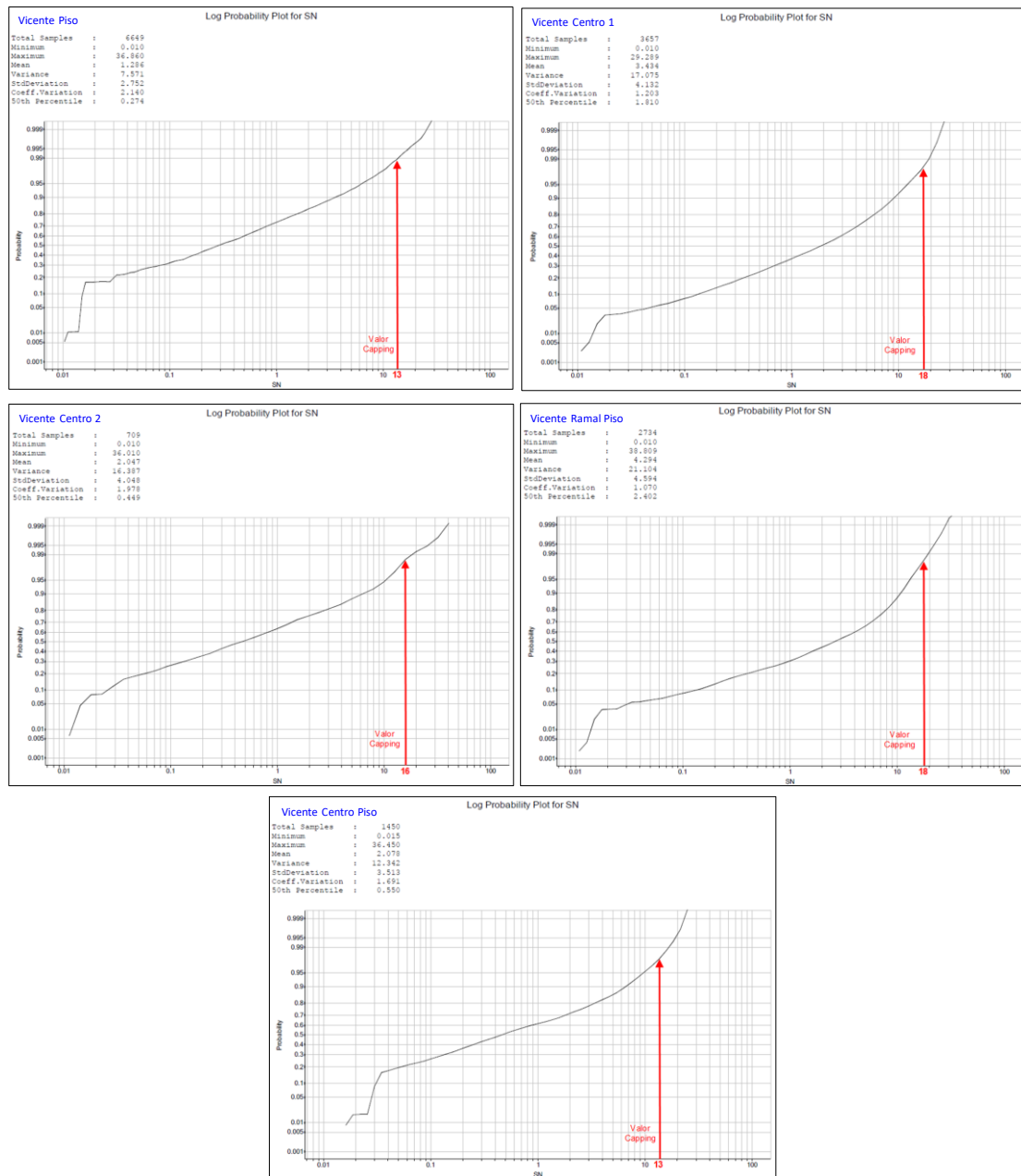


Figura 42: Valor capping del sistema de vetas Vicente.

La aplicación del capping tiene impacto sobre varios factores estadísticos de la base de datos, como son: la reducción de las leyes altas, porcentaje de muestras limitadas y principalmente en la disminución del coeficiente de variación (CV). Los límites del



capping son asignados independientemente para cada una de las estructuras que conforman el sistema de vetas Vicente, las cuales se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Valor capping del sistema de vetas Vicente.

ZONA	VALOR CAPPING	NSAMPLES	NSAMPLES ACOTADAS	% SAMPLES ACOTADAS
Vicente Piso	13	6,649	142	2%
Vicente Centro Principal 1	18	3,657	79	2%
Vicente Centro Principal 2	16	709	18	3%
Vicente Ramal Piso	18	2,734	52	2%
Vicente Centro Piso	13	1,450	58	4%

5.1.4.4. Composición de las muestras

Un mismo conjunto de datos no debe tener muestras de longitudes distintas, por lo cual es necesario llevar las muestras a compósitos de una misma longitud. Se realiza el análisis de las longitudes de muestreo para la elección del tamaño de compósito a partir de la moda, mediante histogramas; se observa que la totalidad de vetas del sistema Vicente tienen longitudes de muestreo menores a 2 metros tratándose de estructuras relativamente delgadas, por tal motivo la compósición de las muestras se realizara en toda su longitud con el objetivo de tener muestras más representativas en ley y longitud, a excepción de la estructura Vicente Centro Piso que es una estructura tipo cuerpo y la longitud recomendada de compósito es de 1 metro que es el muestreo constante en este tipo de estructuras.

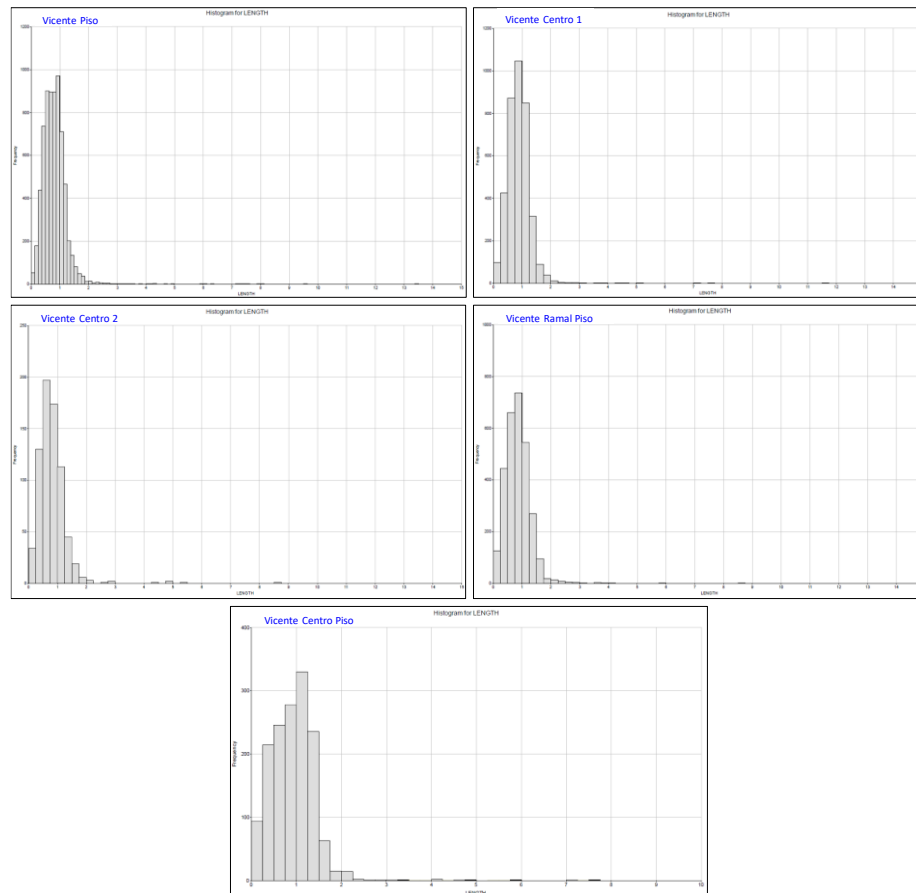


Figura 43: El 98% de muestras de la veta Vicente Piso tienen longitudes de muestreo < 2 m.

Tabla 11. Estadísticas de la data compositada.

ZONA	NSAMPLES	MINIMUM	MAXIMUM	MEAN	VARIANCE	STANDDEV	COEFF.VARIATION
Vicente Piso	2,800	0.010	13.000	1.143	3.436	1.854	1.523
Vicente Centro Principal 1	1,173	0.010	18.000	3.287	9.252	3.042	0.926
Vicente Centro Principal 2	360	0.010	15.310	1.630	6.169	2.484	1.524
Vicente Ramal Piso	884	0.010	16.897	3.951	11.680	3.418	0.865
Vicente Centro Piso	1,364	0.015	13.000	2.003	6.376	2.525	1.261

En la tabla 11 se observa que el acotamiento (capping) aplicado a la data inicial ha disminuido las leyes altas y esta disminución es reflejado en la media y en los coeficientes de variación de cada estructura que conforma el sistema de vetas Vicente, cuya mineralización es encuentra entre mediana a baja variabilidad haciendo que la data empleada sea más confiable para el proceso de estimación de recursos.

Tabla 12: Estadísticas comparativas de la data inicial y compositada.

ZONA	SAMPLES					COMPÓSITOS				
	NSAMPLES	MINIMUM	MAXIMUM	MEAN	COEFF.VARIATION	NSAMPLES	MINIMUM	MAXIMUM	MEAN	COEFF.VARIATION
Vicente Piso	6,649	0.010	36.860	1.286	2.140	2,800	0.010	13.000	1.143	1.523
Vicente Centro Principal 1	3,657	0.010	29.289	3.434	1.203	1,173	0.010	18.000	3.287	0.926
Vicente Centro Principal 2	709	0.010	36.010	2.047	1.978	360	0.010	15.310	1.630	1.524
Vicente Ramal Piso	2,734	0.010	38.809	4.294	1.070	884	0.010	16.897	3.951	0.865
Vicente Centro Piso	1,450	0.015	36.450	2.078	1.691	1,364	0.015	13.000	2.003	1.261

5.1.5. Análisis estructural

El presente análisis estructural es a partir de la data compositada para vetas y cuerpos que consiste en la generación de variogramas experimentales en tres direcciones para conocer los ejes principales de anisotropía, el primer plano es en una sección longitudinal, la segunda en dirección del plano o planta; en esta dirección la data esta espaciada por la distancia que hay entre canales de muestreo y la tercera dirección en el plano del dip o buzamiento; en este plano la distancia que predomina entre canales es de nivel a nivel. Por lo tanto, se definen los parámetros de la distancia h llamado también lag que es la distancia que existe entre muestras. Definidos los parámetros se procede a la búsqueda de los variogramas experimentales, una vez realizado los variogramas tomamos los tres variogramas de mayor alcance y anisotropía. Luego procedemos a realizar el modelamiento variografico. El proceso de esta actividad es reiterativo y se realiza de igual manera para las demás estructuras.

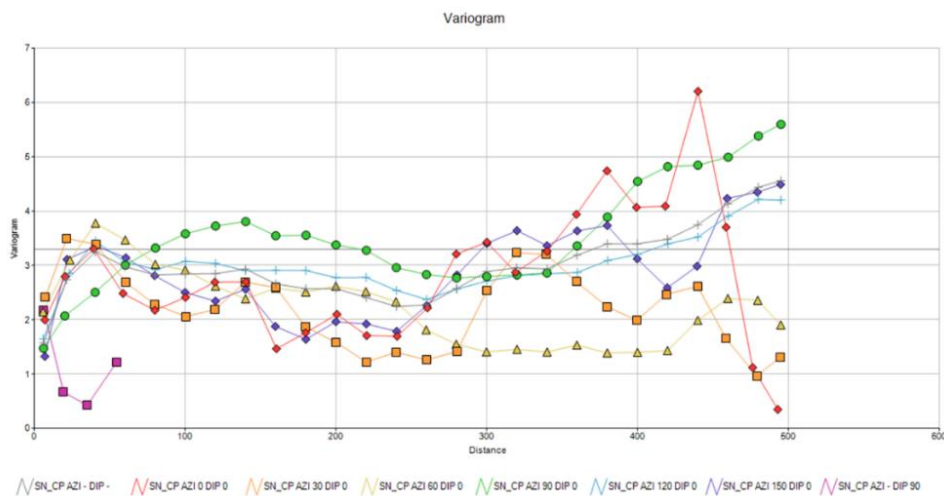


Figura 44: Variogramas experimentales en las diferentes direcciones.

5.1.5.1. Modelamiento del variograma

Después de calcular los variogramas experimentales en las tres direcciones, se eligen aquellas direcciones de variogramas perpendiculares entre sí que reflejen una buena continuidad de la correlación entre leyes y se procede a modelarlos. El variograma con frecuencia mantiene un crecimiento desde el origen hasta lograr alcanzar un valor estable que es la meseta y logra alcanzar la meseta a una distancia determinada h de separación entre las muestras denominada alcance, tal como se muestra en la siguiente imagen.

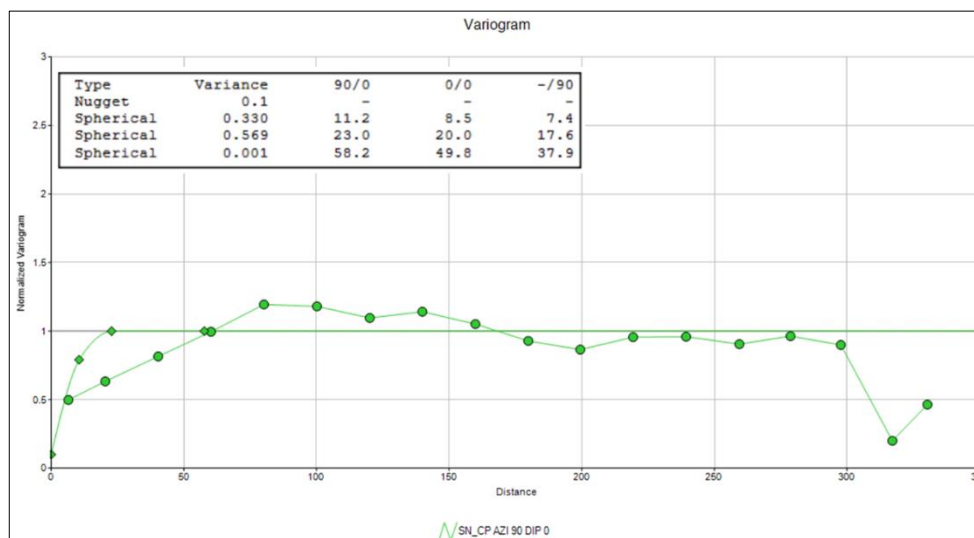


Figura 45: Variograma modelado de la veta Vicente Ramal Piso.

Tabla 13: Parámetros variográficos modelados.

ZONA	TIPO	ANGULO			PEPITA	VARIANCE	ALCANCE		
		EJE 3	EJE 2	EJE 1			STRIKE	DIP	CX.STRIKE
Vicente Piso	Esférico	63	26	58	0.1	0.451	13.8	10.1	6.4
					0.1	0.382	39.5	35.8	17.9
					0.1	0.067	99.7	68.9	49.2
Vicente Centro Principal 1	Esférico	47	0	77	0.1	0.120	9.4	8.5	6.1
					0.1	0.780	27.3	20.7	14.9
					0.1	0.000	64.8	48.8	35.3
Vicente Centro Principal 2	Esférico	82	54	55	0.1	0.267	13.2	9.7	7.0
					0.1	0.629	30.3	27.6	18.4
					0.1	0.004	44.3	39.7	33.4
Vicente Ramal Piso	Esférico	48	0	69	0.1	0.330	11.2	8.5	7.4
					0.1	0.569	23.0	20.0	17.6
					0.1	0.001	58.2	49.8	37.9
Vicente Centro Piso	Esférico	83	53	52	0.1	0.021	7.8	5.6	3.7
					0.1	0.861	15.3	12.4	10.5
					0.1	0.018	26.2	23.8	19.1

5.1.5.2. Visualización del elipsoide de influencia

Del análisis y modelamiento de los variogramas y sus anisotropías, es posible encontrar un elipsoide de influencia o búsqueda que determinara los alcances para la selección de muestras que servirán para la estimación de leyes de los recursos minerales

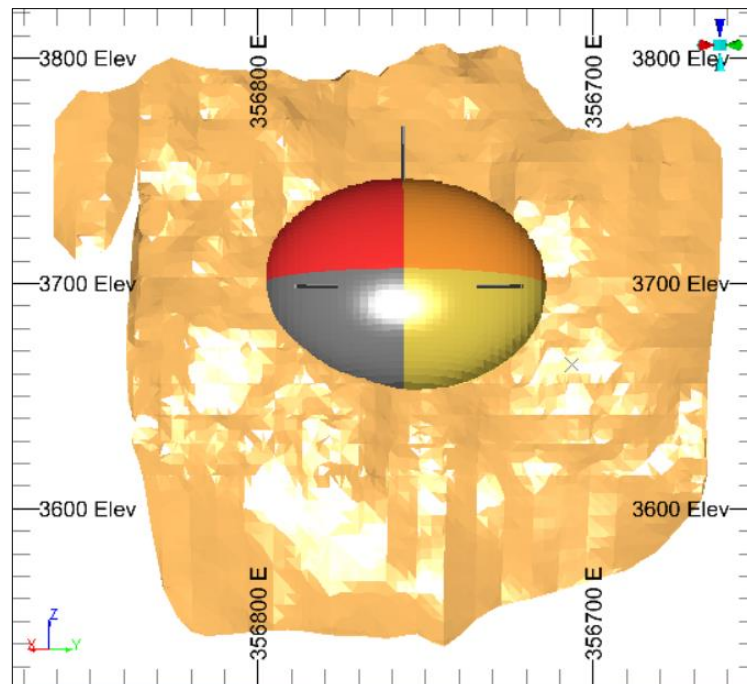


Figura 46: Elipsoide de influencia vista en sección longitudinal.

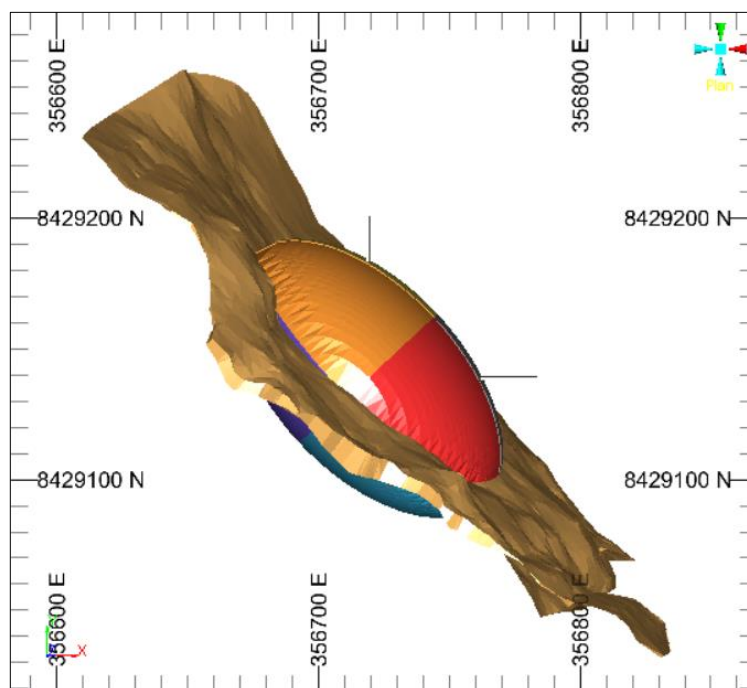


Figura 47: Elipsoide de influencia vista en planta.

5.1.6. Estimación de recursos minerales

5.1.6.1. Densidad de mineral

Para obtener la densidad aparente del mineral, se colectaron muestras de mano provenientes de interior mina y muestras de testigos de perforación diamantina, las cuales son enviadas al laboratorio para determinar su densidad aparente por el método de la parafina. Los datos de densidades aparentes, obtenidos de la colección de muestras, han permitido realizar trabajos estadísticos para determinar valores de densidad aparente medias para cada población de datos. El trabajo estadístico permitió utilizar la mediana como estadígrafo principal en la asignación de la densidad.

Por la cantidad de datos mayores a 50 muestras, Vicente Centro y Vicente Piso han obtenido valores de densidad aparente únicos derivados de las medianas de sus poblaciones de datos, mientras que las demás vetas se les asignó el valor de la mediana de la población total de datos.

Tabla 14: Datos de densidades aparentes.

Densidad Aparente	VETAS			
	VICENTE PISO	VICENTE CENTRO	VICENTE RAMAL PISO	VICENTE CENTRO PISO
Mineral	2.77	2.78	2.81	2.81

Unidades expresadas en t/m^3

5.1.6.2. Definición del modelo volumétrico

El modelo volumétrico o también conocido como prototipo se define como el paralelepípedo que incluye al sólido de la estructura geológica, además contiene información de las coordenadas X, Y, Z del origen, tamaño de bloques y número de bloques patrón.

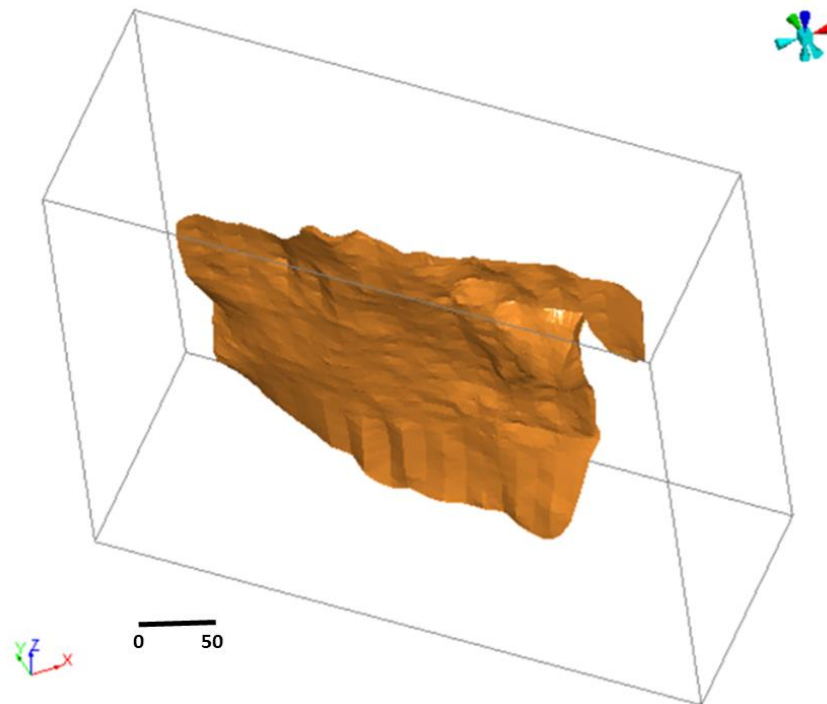


Figura 48: Prototipo de trabajo.

5.1.6.3. Elección del tamaño de bloque

Para la elección de tamaño de bloque adecuado se consideran los siguientes parámetros:

- Continuidad de la mineralización
- Tamaño de las muestras, espaciamiento y distribución entre ellas
- Tamaño de compósitos de muestras
- Dirección y alcances de anisotropía

Para el presente estudio se tomó como tamaño de bloques; para el caso de las vetas de 4 metros en el eje X, 4 metros en el eje Y, para el eje Z una longitud que cubra toda la potencia de la veta que por considerarse estructuras delgadas serán explotadas en su ancho total, para el caso de cuerpos se considera una dimensión de bloque de 4 metros en el eje X, 4 metros en el eje Y, y 1 metro en el eje Z, esto tomando como base el muestreo que generalmente se realiza en estocadas y el tamaño de compósito de muestras que es a 1 metro.

Tabla 15: Tamaño de bloques.

ZONA	X	Y	Z
Vicente Piso	4	4	Ancho Veta
Vicente Centro Principal 1	4	4	Ancho Veta
Vicente Centro Principal 2	4	4	Ancho Veta
Vicente Ramal Piso	4	4	Ancho Veta
Vicente Centro Piso	4	4	1

5.1.6.4. Estimación de leyes

La variable en estudio fue estimada utilizando el interpolador kriging ordinario, teniendo en cuenta el modelo variográfico obtenido para el estaño. Por tratarse de una estimación en tres dimensiones haremos el uso de un elipsoide, la cual tendrá las siguientes dimensiones de 15, 15 y 20 m en las direcciones X, Y, Z, respectivamente para recursos medidos, el segundo elipsoide de búsqueda es definido por la multiplicación de los ejes principales de búsqueda por un factor de expansión en este caso tres y cuatro como factor de expansión, el primer factor nos da un recurso categorizado como indicado y la segunda como un recurso categorizado como inferido, el siguiente paso es definir la cantidad de muestras que involucraran cada elipsoide la cual está condicionado por la malla o distancia de muestreo que es cada tres metros en el caso de canales y muestreos puntuales en sondajes diamantinos no teniendo un metraje definido, teniendo en cuenta estos parámetros se estableció utilizar un mínimo y un máximo de muestras dentro del elipsoide de búsqueda tal como indica la tabla 16.

Tabla 16: Elección del elipsoide de búsqueda y numero de compósitos.

CATEGORIA	COMPOSITOS		ELIPSOIDE BUSQUEDA		
	MINIMO	MAXIMO	V1	V2	V3
Medido	6	10	15	15	20
Indicado	4	10	45	45	60
Inferido	2	10	135	135	180



5.1.7. Validación de la estimación de recursos

Los recursos minerales del sistema de vetas Vicente han sido estimados por el interpolador kriging ordinario (OK), además para fines de validación, el modelo ha sido estimado por el interpolador del inverso a la distancia al cuadrado (ID2) y por el vecino más cercano (NN).

Todos los modelos han sido validados utilizando medios visuales y estadísticos para evaluar la posibilidad que exista favoritismo en la estimación (sesgo). También se generaron gráficos de hileras para realizar la validación local de la estimación. Se considera que las validaciones realizadas a los modelos son suficiente como para confiar en ellos como Recursos Minerales y generar los respectivos reportes de tonelajes y leyes.

5.1.7.1. Validación local de la estimación de recursos

Se han generado gráficos de hilera para validar la estimación de recursos. Un gráfico de hilera es una visualización gráfica de la distribución de la ley; que se derivada en una serie de bandas de espesor constante (12 y 50 metros de ancho en este caso) y franjas transversales, generadas en las orientaciones X, Y, Z de los modelos estimados.

Las variaciones de ley del modelo de bloque se comparan utilizando el gráfico de hilera con la distribución de ley de los compósitos y los otros interpoladores de estimación como son el inverso a la distancia al cuadrado y el vecino más cercano. Un ejemplo de gráfico de hilera para todas las estimaciones realizadas se muestra en la Figura 49, ilustrando la comparación entre el interpolador kriging ordinario utilizada para reportar leyes. en general, las leyes estimadas representan una aproximación a las leyes de los compósitos de muestras.

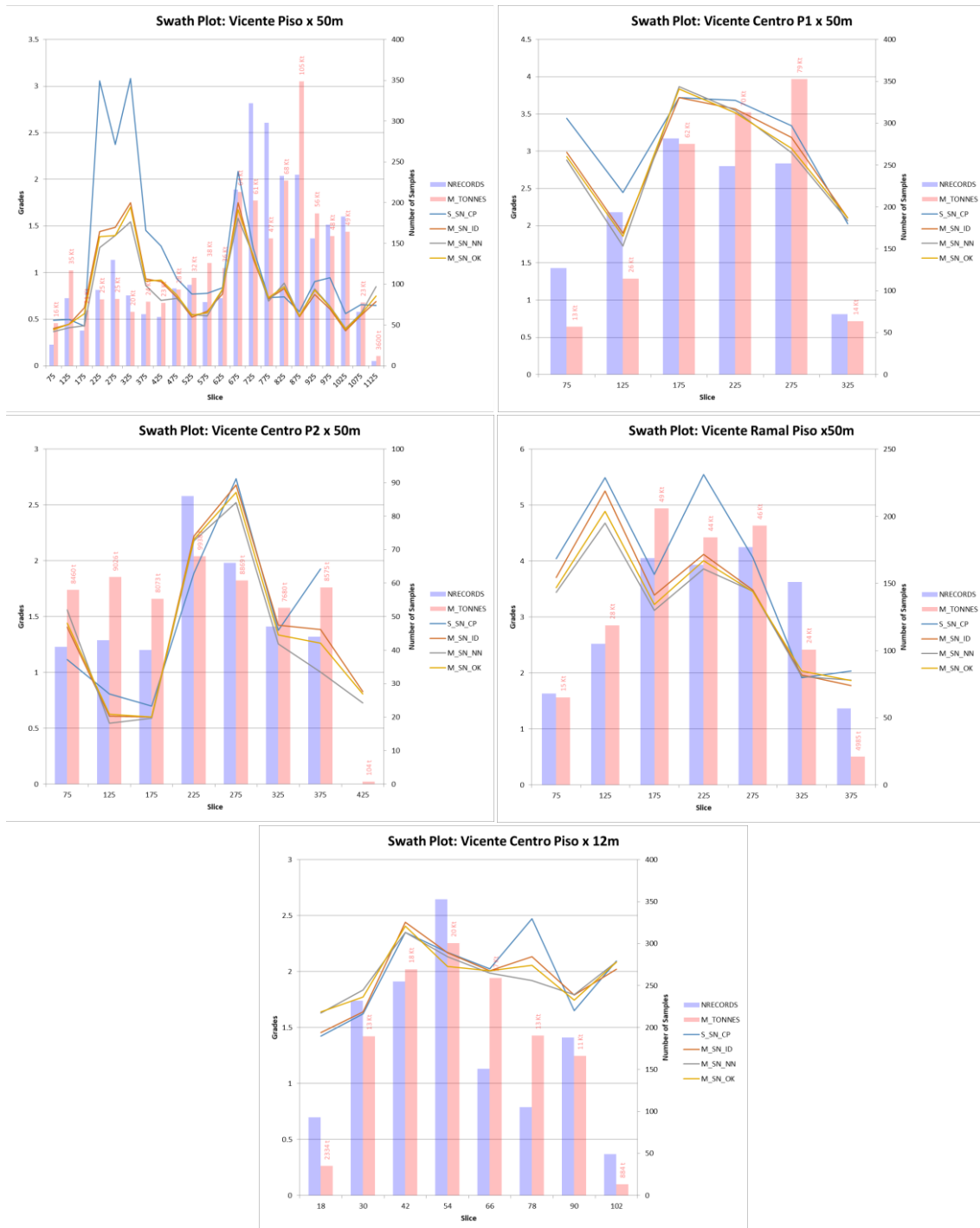


Figura 49: Validación local de la estimación de recursos.

5.1.7.2. Validación global de la estimación de recursos

Se comparo las medias globales de la ley de estaño de los bloques estimados por kriging ordinario con los interpoladores vecino más cercano e inverso a la distancia al cuadrado para asegurarse tener una ley media similar a la de los otros interpoladores

(sesgo aceptable), lo cual se evidencia en la tabla 17, estos resultados demuestran que existe un acuerdo aceptable entre los diferentes interpoladores de estimación empleados, esto apoya a que los recursos tengan un bajo riesgo de sobreestimación. el valor en la variación de los resultados por cada interpolador no puede exceder en +/-5%, en el caso exista una variación mayor o menor a este porcentaje, se identifican los errores y se corrigen. Estos errores pueden estar vinculados a errores de muestreo, de análisis y al sobredimensionamiento del yacimiento.

Tabla 17: Validación global de la estimación de recursos.

ZONA	PROMEDIO GLOBAL DE MUESTRAS		LEYES INTERPOLADAS			% VARIACIÓN DE LEYES ENTRE INTERPOLADORES		
	MUESTRAS ORIGINAL	MUESTRAS COMPOSITADAS	SN_OK	SN_ID	SN_NN	SN_OK/SN_ID	SN_OK/SN_NN	SN_ID/SN_NN
Vicente Piso	1.29	1.14	0.89	0.89	0.88	0%	-1%	-1%
Vicente Centro Principal 1	3.43	3.29	3.19	3.22	3.17	1%	-1%	-2%
Vicente Centro Principal 2	2.05	1.63	1.47	1.51	1.48	2%	0%	-2%
Vicente Ramal Piso	4.29	3.95	3.52	3.51	3.48	0%	-1%	-1%
Vicente Centro Piso	2.08	2.00	2.00	2.05	2.03	2%	-1%	-1%

5.1.7.3. Validación visual de la estimación de recursos

Se realizaron comparaciones visuales de las leyes de los compósitos de muestras versus las leyes del modelo de bloque en cada una de las estructuras. En general, las distribuciones de ley en los bloques coinciden de manera adecuada con las leyes del mineral de los compósitos, vistas en una sección longitudinal. Como se muestran en la figura 50.

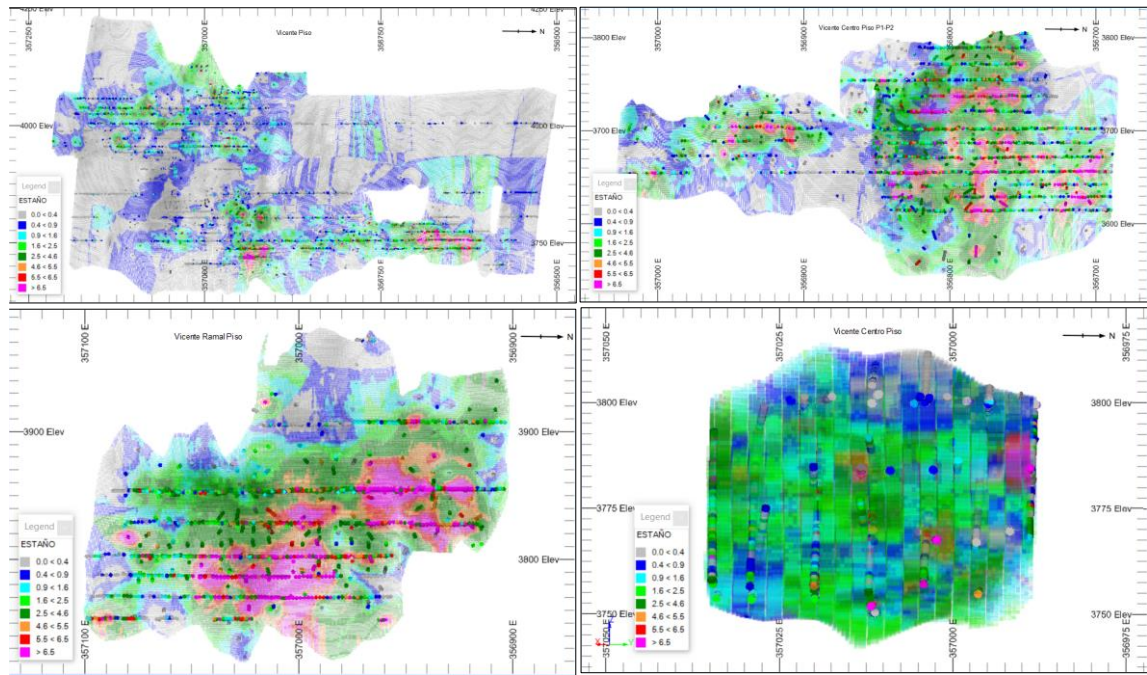


Figura 50: validación visual de la estimación de recursos.

5.2. CATEGORIZACIÓN Y INVENTARIO DE RECURSOS

El modelado de recursos realizada las respectivas validaciones representan la información y el conocimiento geológico. Como también la ubicación de las muestras y los datos de ensayos son lo suficientemente fiables como para apoyar la estimación de los recursos y por ende realizar una adecuada categorización de ellos en medido, indicado e inferido, posteriormente tener un reporte de tonelajes y leyes del sistema de vetas Vicente en sus respectivas categorías.

Los bloques estimados se categorizan de acuerdo con:

- Confianza en la interpretación geológica de las zonas mineralizadas
- Número de datos (muestras de canales y muestras de perforación diamantina) utilizados para estimar un bloque
- Distancia de los compósitos utilizados para estimar un bloque.



Para clasificar la mineralización en recursos minerales medidos, debe tenerse en cuenta la siguiente declaración: "la cantidad, la ley o la calidad, las densidades, la forma y las características físicas se estiman con suficiente confianza para permitir la aplicación de los factores modificadores con suficiente detalle para realizar la planificación detallada de la mina y la evaluación de la viabilidad económica del yacimiento". Para la clasificación de los recursos minerales indicados se requiere lo siguiente: "cantidad, ley o calidad, densidades, forma y características físicas se estiman con la suficiente confianza para permitir la aplicación de los factores modificadores con suficiente detalle para apoyar la planificación y evaluación de la viabilidad económica del depósito".

Se utilizó los siguientes parámetros generales para la clasificación de los recursos minerales:

Recursos Medidos: Bloques estimados con una distancia de 15 a 20 metros que cuenten por al menos con seis muestras.

Recursos Indicados: Bloques estimados con una distancia de 20 a 60 metros que cuenten por al menos con cuatro muestras.

Recursos Inferidos: Bloques estimados con una distancia de 60 a 180 metros que cuenten por al menos con dos muestras.

Todas las áreas que contienen menos de 2 muestras de perforación diamantina, canales o ambos, donde no se consideran recursos minerales. Estas áreas deben considerarse como áreas de exploración y requieren perforación adicional para satisfacer las Normas y Definición del código JORC y la norma NI 43-101.

La tabla 18 muestra las toneladas y leyes promedio totales que fueron estimados del sistema de vetas Vicente, donde se observa que la veta Vicente Piso es la que cuenta

con mayor tonelaje y menor ley promedio en comparación con la veta Vicente Ramal Piso que presenta la mayor ley promedio del sistema de vetas.

Tabla 18: Tonelajes y leyes promedios del sistema de vetas Vicente.

ZONA	TONELADAS	SN%
Vicente Piso	2,344,548	0.83
Vicente Centro Principal 1	734,685	3.18
Vicente Centro Principal 2	168,817	1.46
Vicente Ramal Piso	593,152	3.52
Vicente Centro Piso	265,939	2.03

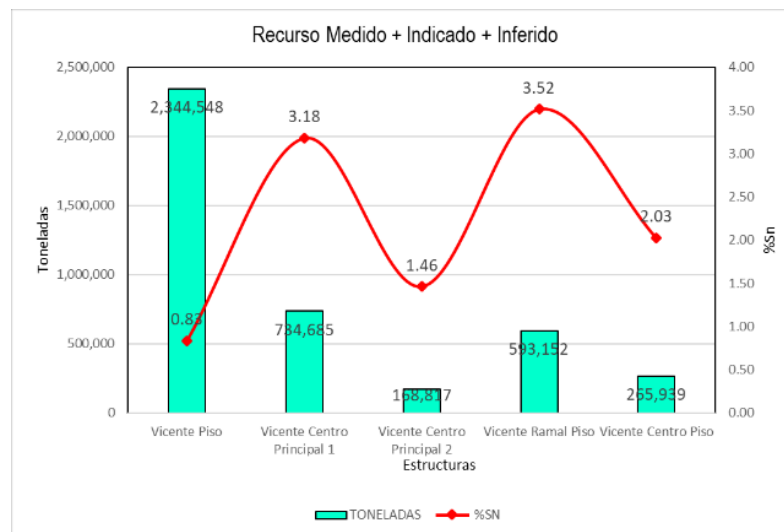


Figura 51: Tonelaje y ley de recursos del sistema de vetas Vicente.

En la tabla 19 se clasifican y reporten los recursos minerales estimados, teniendo en cuenta solo las categorías establecidas aplicables a recursos minerales, se reporte cada categoría por separado en recursos medidos, indicados e inferidos tal como lo establece la norma canadiense NI 43-101.

Tabla 19: Clasificación, resultados e inventario de recursos.

ZONA	CATEGORIA	TONELADAS	%SN	POTENCIA	TMF
Vicente Piso	Medido	999,511	1.12	2.18	11,199
	Indicado	998,131	0.66	1.75	6,592
	Medido + Indicado	1,997,642	0.89	1.96	17,791
	Inferido	346,906	0.51	1.17	1,767
	Total	2,344,548	0.83	1.85	19,558
Vicente Centro Principal 1	Medido	637,247	3.37	3.03	21,486
	Indicado	96,292	1.95	2.15	1,878
	Medido + Indicado	733,539	3.19	2.91	23,364
	Inferido	1,146	0.65	0.60	7
	Total	734,685	3.18	2.91	23,372
Vicente Centro Principal 2	Medido	83,370	1.89	1.56	1,574
	Indicado	83,311	1.06	1.28	882
	Medido + Indicado	166,681	1.47	1.42	2,455
	Inferido	2,135	0.66	0.77	14
	Total	168,817	1.46	1.41	2,469
Vicente Ramal Piso	Medido	458,377	3.84	2.84	17,621
	Indicado	134,094	2.40	2.20	3,224
	Medido + Indicado	592,470	3.52	2.70	20,845
	Inferido	681	1.14	0.94	8
	Total	593,152	3.52	2.70	20,853
Vicente Centro Piso	Medido	265,939	2.03	0.98	5,392
	Indicado	0	0.00	0.00	0
	Medido + Indicado	265,939	2.03	0.98	5,392
	Inferido	0	0.00	0.00	0
	Total	265,939	2.03	0.98	5,392

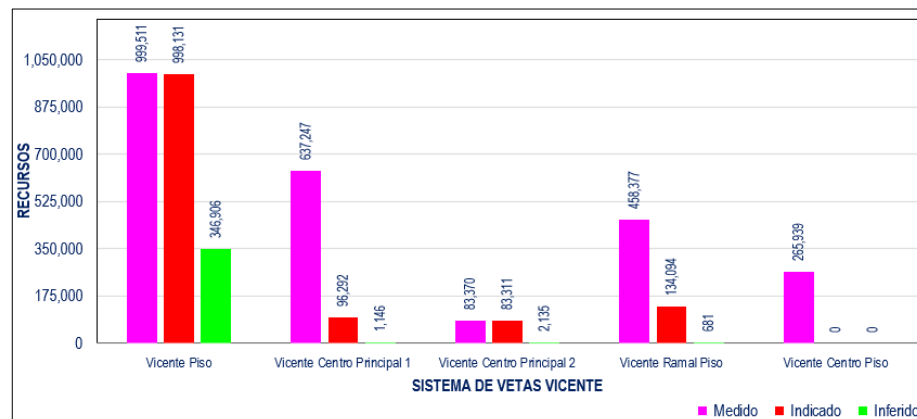


Figura 52: Distribución del tonelaje del sistema de vetas Vicente.

De los recursos minerales estimados, los que pasan a ser considerados como reservas de mena son los recursos que tiene las categorías de medido e indicado por tener la suficiente confiabilidad geológica, la tabla 20 muestra los resultados totales de estas categorías.

Tabla 20: Tonelajes y leyes promedios, medidos e indicados.

ZONA	TONELADAS	%SN
Vicente Piso	1,997,642	0.89
Vicente Centro Principal 1	733,539	3.19
Vicente Centro Principal 2	166,681	1.47
Vicente Ramal Piso	592,470	3.52
Vicente Centro Piso	265,939	2.03

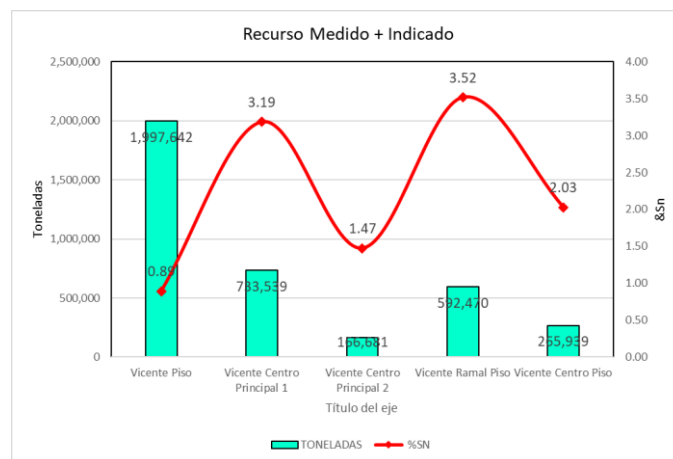


Figura 53: Tonelaje y ley de recursos medidos e indicados.

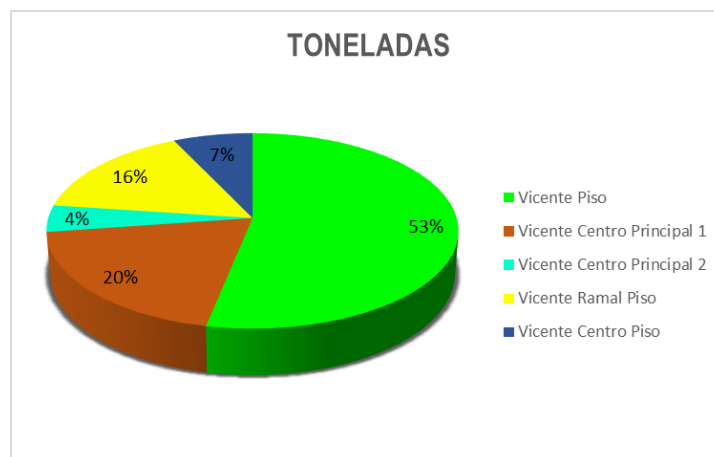


Figura 54: Distribución de tonelaje del recurso medido e indicado.

En la figura 55 se muestra a la veta Vicente Piso categorizado en medido, indicado y un área extensa de 346,906 toneladas como recursos inferidos en comparación con las otras estructuras que solo presentan categorías de recursos medidos como la estructura Vicente Centro Piso esto por la cantidad de muestras que intervinieron y la extensión de la estructura que dan mayor confiabilidad a la estimación de recursos de igual modo las estructuras de Vicente Centro y Vicente Ramal Piso presentan categorizaciones de medido, indicado y pequeñas áreas de recursos inferidos. 4,271 y 681 toneladas respectivamente.

Tabla 21: Categorización de recursos en medidos, indicados e inferido.

ZONA	CATEGORIA	TONELADAS	%SN	POTENCIA	TMF
Categoria	Medido	2,444,444	2.34	2.37	57,272
	Indicado	1,311,827	0.96	1.79	12,576
	Inferido	350,869	0.51	1.16	1,796
	Total	4,107,140	1.74	2.09	71,644

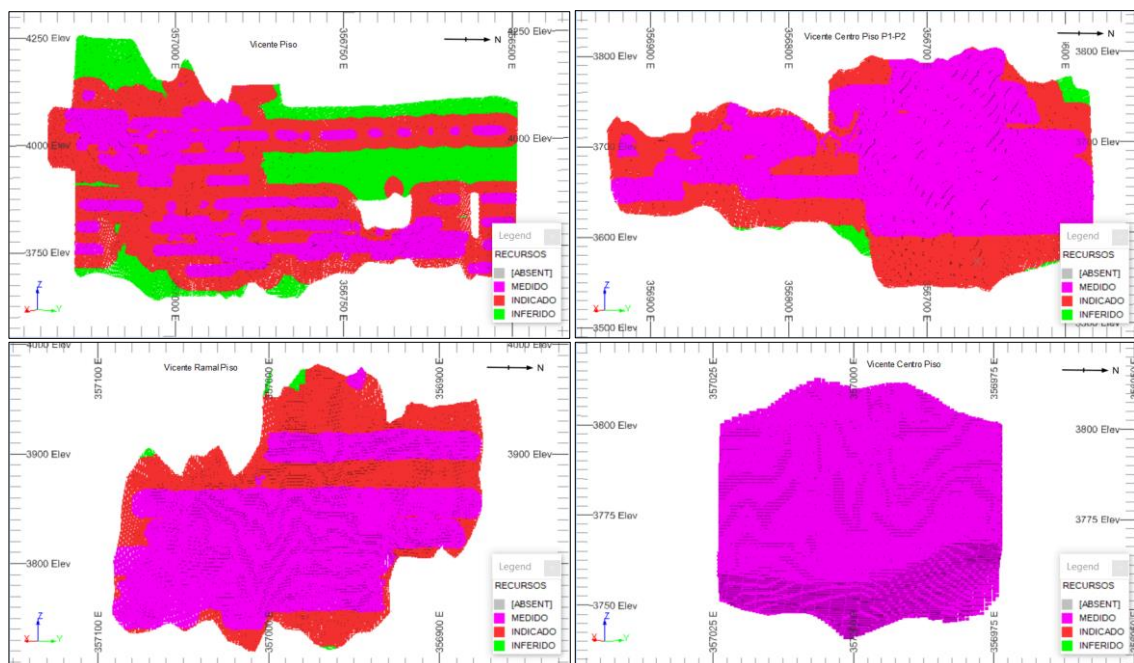


Figura 55: Vista longitudinal 3-D de la categorización de recursos.



5.2.1. Reservas

Para el reporte de reservas minerales en la mina San Rafael, se usa como base guía el código JORC, para ello se consideran factores como:

- Consideraciones de minado
- Geológicos
- Procesamiento
- Metalúrgico
- infraestructura
- Contenido metálico de corte
- Económico
- Evaluación de mercado
- Geomecánicas
- Otros

- **Consideraciones de minado**

El método de explotación empleado en la mina San Rafael es el de taladros largos; entonces se estiman las reservas minerales aplicando factores de diseño como son la dilución, recuperación de minado, sobre el diseño de cada tajo a explotar. Para ello, primero se identifican las estructuras mineralizadas que estrictamente cumplen con las condiciones para su explotación; segundo se identifican las estructuras mineralizadas por su accesibilidad, es decir aquellas que tienen mayor nivel de desarrollo y preparación para poder planificar el corto plazo; tercero, las estructuras que tienen menor nivel de preparación se usan para el mediano plazo; cuarto, las estructuras recién identificadas, estructuras secundarias o ramales que no tienen las condiciones de minado por taladros largos son consideradas para los trabajos de planificación de largo plazo.



- **Geológico**

Se tienen identificadas las estructuras mineralizadas, muchas de las cuales tienen estructuras principales y secundarias, para efectos del trabajo a corto plazo y mediano plazo, se consideran las estructuras principales, pero las estructuras secundarias se mantienen como recursos, los cuales se consideran para los trabajos de planificación de largo plazo.

- **Procesamiento**

No se tratan los minerales de baja ley, por el costo que esto implica, ya que la política de la empresa es la maximización del flujo de caja, además de la variación en los resultados del proceso (calidad de concentrado y recuperación). Sin embargo, se tiene mineral de baja ley que se debe analizar bajo una mayor investigación metalúrgica.

- **Metalúrgicos**

La planta concentradora de la mina San Rafael, trata minerales de casiterita (SnO_2) produciendo dos tipos de concentrados, utilizando el método de concentración gravimétrica (jigs - espirales - mesas) con una flotación inversa para la eliminación de contaminantes y por flotación directa de la casiterita, previa limpieza de contaminantes por flotación.

- **Infraestructura**

Para la estimación de reservas, no se considera aquel mineral que está en zonas adyacentes a las infraestructuras mineras como son: rampas principales, cámaras de bombeo, planta prell, chimeneas del circuito de ventilación, etc. Este mineral se sigue considerando dentro de los recursos minerales, pero que con un futuro cambio de lugar de dicha infraestructura o cambio del método de minado, pasarían ser considerados como reservas minerales.



- **Contenido metálico de corte**

Solo se tiene al estaño como único elemento metálico en evaluación. Por ser una operación de minado subterráneo a través de taladros largos, se calcula el cut off económico que hace rentable la explotación de los tajos, y se expresa en la ley de estaño para determinar las zonas rentables de ser minadas y cuales no son rentables.

- **Económico**

Para la estimación de reservas minerales, se considera el cut off calculado con los costos. Se tienen tres valores referenciales: aquel cut off que paga todos los costos operativos o de producción mina, así como el costo de fundición, transporte de concentrado, etc.; y el cut off que cubre adicional a todo lo descrito anteriormente, los costos de depreciación y seguros. A pesar de los cut off calculados, se debe mencionar que los planes de minado tienen una ley promedio mucho mayor que permite tener mayor flexibilidad en el manejo financiero.

- **Evaluación de mercado**

La mina San Rafael, es uno de los principales productores de estaño en el mundo, lo que lo posiciona estratégicamente en el mercado internacional.

- **Geomecánicas**

Las estructuras mineralizadas que cumplen estrictamente con las condiciones geomecánicas para el minado por taladros largos son consideradas dentro de las reservas minerales; las que no cumplen siguen siendo parte de los recursos minerales, aquellas estructuras muy pequeñas, por ejemplo aquellas estructuras muy pequeñas que son consideradas dentro de los recursos, pero que están adyacentes a las estructuras principales no podrán ser explotadas bajo el método actual por problemas de estabilidad geomecánica.



- **otros**

la principal variable que puede hacer viable o no la actividad minera, es el factor ambiental y social. Minsur en ambos casos es una empresa con un alto compromiso ambiental demostrado a través de sus años de operación; así mismo es bien conocido por su buen manejo y trato armonioso con las comunidades y poblaciones aledañas.

En función de estas consideraciones se discretiza los recursos minerales y se transforman a reservas minerales, para así cumplir con lo estipulado por el código JORC (ver figura 5). Las estructuras mineralizadas que no cumplan con lo mencionado líneas arriba se siguen considerando recursos minerales con sus respectivas categorías.

5.2.2. Discusión

De los resultados se tiene que la veta Vicente Piso tiene la mayor cantidad de tonelaje con una ley promedio relativamente baja, siendo esta muy beneficioso para poder realizar un adecuado blending e incrementar el tonelaje de alimentación a planta concentradora para tener una ley que cumpla el programa de producción semanal y mensual.

En esta parte del trabajo de investigación tomaremos información de las tesis realizadas por Quispe (2017) y Salinas (2012),

Quispe (2017). Indica en su trabajo de investigación “Se evidencia que el procedimiento clásico de estimación de recursos por el método de perfiles permite conocer directamente y determinar la geometría de los bloques y así realizar una clasificación de los recursos”. Difiere con el presente trabajo de investigación por que se emplea el proceso de estimación geoestadística que tiene la ventaja de tomar en cuenta el fenómeno regionalizado que es la continuidad de la mineralización en el depósito. Por lo



que el kriging tiende a eliminar los defectos de subestimación y los excesos de sobre estimación que presentan los métodos clásicos de estimación de recursos en minería.

Salinas (2012). Menciona en su trabajo de investigación “Para realizar todo el análisis se trabajó con una base de 8513 datos obtenida a partir de una campaña de exploración de 70 sondajes de diamantina. Las cuatro variables con las cuales se trabajó durante el estudio son las siguientes: Ley de fierro (%), Ley de silice (%) y Densidad de roca (tn/m^3). Con el fin de estimar estas variables en todo el espacio requerido, se hará uso de la técnica conocida como co-kriging, extensión al contexto multivariable del kriging”. En comparación con esta tesis para la estimación de recursos del sistema de vetas Vicente se trabajó los datos en un contexto univariable teniendo al estaño como única variable en estudio.



VI. CONCLUSIONES

- Se realizaron tres tipos de validaciones con la finalidad de encontrar algún sesgo significativo en la estimación de recursos minerales.

Validación local: Se realizaron gráficos de hileras para la ley de estaño con los resultados de la estimación, la cual permite concluir que la estimación no presenta sesgos locales en los valores de estaño en la dirección este-oeste.

Validación global: Con la información de la estimación del kriging ordinario (OK) se realizó la comparación con los distintos interpoladores como son el vecino más cercano (NN) e inverso a la distancia al cuadrado (ID2), con la finalidad de identificar sesgos globales en las leyes medias de la estimación, no se observan sesgos globales en la estimación de estaño debido a que las diferencias porcentuales de las medias fueron menores a $\pm 5\%$ comparados entre ellos.

Validación visual: Se comparó el modelo de bloques estimado por ley de estaño versus la ley de los compósitos de muestras utilizados en la estimación, hay una buena correlación de las leyes de los bloques versus las leyes de los compósitos.

- Se definieron distintos planes para una adecuada categorización de recursos. En primera instancia, se diseñó un plan de kriging muy exigente, con radios de búsqueda pequeños y una cierta cantidad de compósitos necesarios para entregar un valor estimado; a continuación, se diseñó un segundo plan de kriging, menos exigente que el anterior con menos cantidad de compósitos y mayor radio de búsqueda, en la cual el modelo de bloques estimado se actualizó sólo en aquellos bloques que no habían sido estimados con el primer plan, Se utiliza un tercer plan de kriging, menos exigente que permite generar valores estimados de menor calidad, pues no cuentan con suficientes muestras o se encuentran en sectores



escasamente muestreados en los márgenes de la mineralización. Las categorías se definieron entonces, en función del plan que permitió estimar la ley del bloque: recursos medidos que trata del primer plan y se tiene 2,444,444Tn con una ley de 2.34 %Sn, indicados se trata del segundo plan con 1,311,827Tn con una ley de 0.96 %Sn, e inferidos se trata del tercer plan con 350,869Tn con una ley de 0.51 %Sn.



VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar una estimación por tipos de alteración y litología, que posteriormente podrían ser considerados como dominios geológicos.
2. Planificar una campaña de perforación en las zonas de recursos inferidos con la finalidad de aumentar el conocimiento geológico y confianza para el cambio a una categoría de recurso medido o indicado.
3. Para la densidad de mineral del sistema de vetas Vicente se recomienda asignarle los valores por medio de una estimación geoestadística.



VIII. REFERENCIAS

- Arenas, M. (2000). *Exploración y geología del yacimiento San Rafael Puno. I Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores. Primer volumen de monografías de yacimientos minerales peruanos: historia, exploración y geología*. Instituto Ingenieros de Minas, Lima, Perú.
- Altamirano, J. (1996). *Estimación geoestadística del cuerpo magistral sur de la CIA. Minerales Santander y sensibilidad económica en su explotación*, Lima Perú
- Alfaro, M. (2007). *Estimación de recursos mineros*. Universidad de Chile.
- Alfaro, M. (2002). *Introducción al muestreo minero*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Amphos 21, Consulting Perú. (2014). *Estudio Hidrogeológico y geoquímico*, preparado para Minsur S.A.
- Baez, B. (2018). *Metodología geoestadística aplicada a la estimación de recursos de la veta Bertha San Miguel de Cauri*, Huánuco, Perú.
- Buscaglione V. (2016). *Aplicación de truncarían para la estimación de leyes*, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile.
- Clark, A. (1983). *Ocurrencia y edad de la mineralización del estaño en la cordillera sur del Perú*. Econ. Geol.
- Clark, A. (1990). *Geologic and Geochronologic Constrain on the Metallogenic Evolution of the Andes of Southestem Perú*. Economic Geology Vol. 85, pp. 1520-1583.
- CIM. (2001). National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects, Canadian Securities Administration.



- Emery, X. y Ortiz, J. (2013). *Tópicos especiales de geoestadística*, departamento de ingeniería de minas, facultad de ciencias físicas y matemáticas, universidad de Chile.
- Espinoza, J. (2018). *Caracterización geológica y metodología de estimación de recursos en vetas angostas del batolito de Pataz, Perú*.
- García, C. (1998). *Estadística descriptiva y probabilidades*, segunda edición Lima-Perú.
- Gorgas, J., Cardiel, N. y Zamora, J. (2011). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Madrid-España.
- INGEMMET. (1995). *Geología del Perú*. Lima-Perú.
- INGEMMET. (1996). *Geología del cuadrángulo de macusani, hoja 29 – V*, Lima – Perú.
- Isaaks, E. y Srivastava, R. (1989). *Geoestadística aplicada*, Oxford University.
- Journel, A. y Huijbregts, Ch. (1978). *Geoestadística Minera*, prensa académica.
- JORC. (1999). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves*. (The JORC Code).
- Kontak, D. J. (1984). *La evolución magmática y metalogenética de una interfase crato orogénica: la Cordillera de Carabaya, Andes Centrales, SE del Perú*. Tesis doctoral, Universidad de Queen, Canadá.
- Kontak, D.J., Clark, A.H., Farrar, E., Pearce, T.H., Strong, D.F., and Baadsgaard, H., (1986). *Petrogenesis of a Neogene shoshonite suite, Cerro Moromoroni, Puno, southeastern Peru*: Canadian Mineralogist.
- Laubacher, G. (1973). *Sobre una Discordancia Tardihercínica en la Cordillera Oriental del Sur del Perú*. Boletín N° 3, serie D, Servicio de Geología y Minería.



- Laubacher, G. (1978). *Estudio geológico de la Región norte del Lago Titicaca*, Perú, INGEMMET, Boletín 5. Serie D.
- Long, S. (2000). *Assay Quality Assurance-Quality Control Program for Drilling Projects at the Pre-feasibility to Feasibility Report Level*. Mineral Resource Development Inc., Internal Report.
- Lehmann, B. (1979). *Schichtgebundene Sn-Lagerstätten in der Cordillera Real, Bolivien*. Berlin Geowiss Abh A (14)
- Newell, N. (1949). *Geology of the Lake Titicaca Region, Peru, and Bolivia*. Soc. Amer.-Mem. 36, 104 pp. 4pl.
- Newell, N. (1953). *Upper Paleozoic of Peru*. Geol. Soc. Amer. Mem. 58, 276 pp., 44 pl
- Maque, A. (2017). *Evaluación y clasificación de recursos minerales en la veta milagrosa de la mina Parcoy, Pataz-La Libertad, Lima-Perú*.
- Matheron, G. (1969). *Curso de Geoestadística*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Traducción al español por Marco Alfaro, 2005.
- Marín, A. (1978). *Méthodologie de L'Estimation et Simulation Multivariable des Grands Gisements Tridimensionnels. (Thèse de Docteur Ingénieur)*. L'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- Ortiz, J. (2006). *Apuntes de simulación geoestadística*, facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de ingeniería de minas universidad de Chile.
- Ortiz, J. y Emery, X. (2005). *Categorización de recursos y reservas mineras*, departamento de ingeniería de minas, universidad de Chile.



- Palma, V. (1981). *El sistema de vetas de cobre y estaño de San Rafael, Puno*, SE de Perú.
Tesis de Maestría, Universidad de Queen, Canadá.
- Quispe, A. (2017). *Estudio geológico y estimación de recursos del proyecto Ayahuay, Antabamba-Apurimac* (Tesis inédita de ingeniero). Universidad Nacional del Altiplano. Puno
- Rodriguez, R. (2015). *Estudio estructural entre las vetas San Rafael y Vicente*. Lima-Perú.
- Salinas, I. (2012). *Estimación de recursos en un yacimiento de fierro, memoria para optar el título de Ingeniero Civil de Minas*, Santiago – Chile.
- San Rafael, (2019). *Manual de muestreo geológico*, unidad minera San Rafael.
- Simón, A. (2005). *La calidad de los datos en la estimación de recursos*. Conferencia Magistral, XXVII Convención Minera EXTEMIN, Arequipa – Perú.
- Simón, A. (2008). *Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica*, Santiago – Chile.
- Sandeman, H. (1997). *Lithostratigraphy, petrology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Crucero Supergroup, Puno Department, SE Peru*: Journal of South American Earth Sciences.
- Snowden, (2013). *Estudio de revisión de los procedimientos a validar los recursos y reservas*. Informe técnico preparado para Minsur, Lima – Perú.
- Tinta, J. (2004). *El código australiano de 2004 para reportes sobre resultados de exploración, recursos y reservas minerales (THE JORC CODE)*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo – Ingeniería de minas.



Zartman, R. & Cunningham, C. (1995). *U-Th-Pb zircon dating of the 13.8 Ma dacite volcanic dome at Cerro Rico de Potosí, Bolivia*. Earth Planet. Sci. Lett., 133, 227-237.

Webgrafía

Canchaya, S. (2005). *Introducción a la geoestadística*

http://www.sampling-ok.com/web/publicaciones/2013-01-31_JMH.pdf

Fernández, R. & Tessone, M. (2015). *Geoestadística aplicada a la exploración minera*.

<http://blogs.unlp.edu.ar/geominas/files/2016/08/geoestadistica-2.pdf>

http://en.wikipedia.org/wiki/National_Instrument_43-101



ANEXOS

Anexo A: Mapas de isovalores en sección longitudinal

Anexo B: Secciones verticales del sistema de vetas Vicente

Anexo C: Data empleada en la estimación de recursos