

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS**

**MODELOS GEOMECÁNICOS 3D PARA REDUCIR LA INCERTIDUMBRE DEL  
COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO EN YACIMIENTOS  
POLIMETÁLICOS TIPO CORDILLERANOS: APLICADO A LA MINA CATALINA  
HUANCA, CANARIAS – VÍCTOR FAJARDO – AYACUCHO**

**PRESENTADO POR:**

Br. DANIEL CARPIO ROMERO

Br. ALEXANDRA YENNYFER ESPINOZA PERALTA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ASESOR:**

Mgt. VICTOR VIDAL GARATE GONGORA

**CUSCO- PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: MODELOS GEOMECANICOS 3D PARA REDUCIR LA INCERTIDUMBRE DEL COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO EN YACIMIENTOS POLIMETALICOS TIPO CORDILLERANOS: APLICADO A LA MINA CATANA HUANCA, CANARIAS - VICTOR FAJARDO - AYACUCHO

presentado por: DANIEL CARPIO ROMERO con DNI Nro.: 48360076 presentado por: ALEXANDRA YENNYFER ESPINOZA PERALTA con DNI Nro.: 72736897 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO GEOLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 11 de setiembre de 2024

[Firma]  
Firma  
Post firma Victor Ferrer Sotelo  
Nro. de DNI 29390015  
ORCID del Asesor 0000-002-4296-6482

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:380283062

NOMBRE DEL TRABAJO

**MODELOS GEOMECÁNICOS 3D PARA REDUCIR LA INCERTIDUMBRE DEL COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO EN YACIMI**

AUTOR

**Daniel / Alexandra Carpio / Espinoza**

RECUENTO DE PALABRAS

**41325 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**226363 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**193 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**9.1MB**

FECHA DE ENTREGA

**Sep 10, 2024 9:12 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Sep 10, 2024 9:14 PM GMT-5**

### ● 7% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis amados padres, Mery y Renato, quienes me inspiraron y guiaron para llegar a donde he llegado, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y consejos para hacer de mí una mejor persona.

Alexandra Espinoza

A mis queridos padres, Segundo y Maximiliana, por ser los pilares fundamentales de mi vida. Su guía, sacrificio y dedicación han sido esenciales para convertirme en la persona que soy hoy. Sin su amor incondicional y apoyo, este logro no habría sido posible.

A mis hermanos Henry, Merly, Yanina y Lissett, por estar siempre a mi lado. Cada uno de ustedes ha sido una fuente de inspiración y fortaleza en mi vida.

A mis sobrinos, quienes con sus sonrisas y alegrías han iluminado mis días y me han recordado la importancia de perseguir mis sueños.

Esta tesis es para todos ustedes, con todo mi amor y gratitud.

Daniel Carpio

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera profesional, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante en todos mis años de estudio.

Agradezco también a mi Asesor de Tesis el Mgt. Ing. Víctor Vidal Garate Góngora por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también haber tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo y presentación de la tesis, como a la Dra. Mayssa Vega Guzman por su paciencia y sabios consejos.

Mi agradecimiento también va dirigido al gerente general de “Catalina Huanca Sociedad Minera SAC” el Ing. Johny Orihuela y al jefe de geomecánica el Ing. José Fernández, por haber aceptado que se realice mi Tesis en su prestigiosa empresa.

También agradezco a mi compañero de tesis ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo concluimos esta etapa profesional

Y para finalizar, agradezco a mis padres, mi hermano y también a mi pareja por el apoyo que siempre me brindaron para que esta meta se haga realidad.

Alexandra Espinoza

Primero y, ante todo, agradezco a Dios por haber sido mi guía constante y fuente de fortaleza durante mi formación académica y personal.

A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por su amor incondicional que me ha sostenido en los momentos más difíciles.

A mi asesor Mgt. Ing. Víctor Garate Góngora por todo su apoyo durante la elaboración de la presente, a la Dra. Mayssa Vega por sus comentarios y sugerencias. A mis docentes y mentores, quienes no solo me brindaron su vasto conocimiento, sino que también me motivaron a cuestionar lo aparentemente incuestionable.

A mis mejores amigos y compañeros de clase, por compartir esta aventura conmigo, por los debates interminables, las noches en vela y las risas que hicieron que este camino sea mucho más llevadero y de momentos muy memorables.

Daniel Carpio

## INDICE

RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES.....	17
1.1.    UBICACION Y ACCESIBILIDAD .....	17
1.2.    INTRODUCCION .....	18
1.3.    FORMULACION DEL PROBLEMA .....	18
1.3.1.    Problema general .....	18
1.3.2.    Problemas específicos.....	18
1.4.    HIPOTESIS.....	19
1.4.1.    Hipótesis general.....	19
1.4.2.    Hipótesis específicas.....	19
1.5.    OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.....	19
1.5.1.    Objetivo general.....	19
1.5.2.    Objetivos específicos .....	20
1.6.    JUSTIFICACION.....	20
1.7.    VARIABLES .....	21
CAPÍTULO II : MARCO TEORICO.....	22

2.1.	ESTADISTICA .....	23
2.1.1.	Conceptos básicos .....	23
2.1.2.	Obtención de los datos .....	25
2.1.3.	Distribución de frecuencias.....	25
2.1.4.	Gráficos estadísticos .....	25
2.1.5.	Medidas de tendencia central.....	27
2.1.6.	Medidas de dispersión de datos no agrupados.....	30
2.1.7.	Medidas de forma .....	32
2.1.8.	Coefficiente de asimetría.....	33
2.1.9.	Relación de la media, la mediana y la moda con el sesgo .....	34
2.1.10.	Curtosis .....	34
2.2.	METODOS ESTOCASTICOS .....	35
2.3.	GEOESTADISTICA.....	35
2.3.1.	Estimación.....	36
2.3.2.	Variable regionalizada .....	36
2.3.3.	Datos y modelos.....	39
2.3.4.	Criterios de estimación .....	39
2.3.5.	Estudio exploratorio de datos.....	40
2.3.6.	Despliegue de datos (mapas) .....	41
2.3.7.	Desagrupamiento .....	42

2.3.8.	Diagrama de caja.....	43
2.3.9.	Histograma acumulado .....	44
2.3.10.	Gráfico de probabilidad .....	44
2.3.11.	Conceptos generales sobre el modelamiento geoestadístico de datos .....	45
2.3.12.	Límites de la estadística clásica .....	46
2.4.	LA PRACTICA DEL MODELADO .....	46
2.4.1.	Noción de función aleatoria.....	47
2.4.2.	Caracterización de una función aleatoria.....	47
2.4.3.	Modelos isotrópicos y anisotrópicos.....	51
2.4.4.	Selección de variables.....	53
2.4.5.	Selección del modelo .....	54
2.5.	ANALISIS VARIOGRAFICO .....	55
2.5.1.	Variograma experimental.....	56
2.5.2.	Variograma modelado.....	60
2.5.3.	Efecto pepita o nugget .....	63
2.5.4.	Sill o meseta.....	66
2.5.5.	Rangos.....	67
2.5.6.	Parámetros de anisotropía .....	67
2.6.	LA ESTIMACION LOCAL.....	71
2.6.1.	Interpolación por el vecino más cercano .....	71



2.6.2.	Inverso de la distancia.....	72
2.6.3.	Kriging.....	72
2.6.4.	Validación cruzada.....	76
2.7.	SISMICA.....	76
2.7.1.	Ondas Sísmicas En La Roca .....	76
2.7.2.	Cuantificación de un evento sísmico .....	78
2.8.	MARCO CONCEPTUAL.....	82
2.8.1.	Atributo .....	82
2.8.2.	Variable.....	82
2.8.3.	Individualidad .....	82
2.8.4.	Población.....	82
2.8.5.	Parámetro .....	83
2.8.6.	Estadísticas.....	83
2.9.	ANTECEDENTES.....	84
CAPÍTULO III : CONTEXTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO DEL AREA DE		
ESTUDIO	.....	86
3.1.	GEOLOGIA REGIONAL.....	86
3.1.1.	Complejo Querobamba (Ps-q/gr).....	86
3.1.2.	Grupo Mitu (PsT-mi).....	87
3.1.3.	Grupo Pucará (TrJi-pu).....	87

3.1.4.	Formación Socosani (Js-s).....	88
3.1.5.	Grupo Yura (Js-gr / Js-la) .....	88
3.1.6.	Formación Murco (K-m).....	89
3.1.7.	Formación Arcurquina (K-aq) .....	89
3.2.	GEOLOGIA LOCAL.....	92
3.2.1.	Complejo Querobamba ((Ps-q/gr)) .....	92
3.2.2.	Conglomerado del Grupo Mitu (PsT-mi) .....	92
3.2.3.	Grupo de calizas Pucará (TrJi-pu) .....	93
3.2.4.	Depósito coluvial (Qh-co).....	94
3.2.5.	Depósito aluvial (Qh-al) .....	94
3.2.6.	Depósito fluvial (Qh-fl) .....	95
3.2.7.	Rocas ígneas.....	95
3.3.	GEOMORFOLOGIA LOCAL.....	98
3.4.	GEOLOGIA ESTRUCTURAL LOCAL .....	98
3.4.1.	Sistemas de fallas.....	101
3.4.2.	Discontinuidades.....	103
3.5.	HIDROGEOLOGIA LOCAL .....	107
3.5.1.	Unidades hidrogeológicas reconocidas en mina .....	107
3.5.2.	Conductividad hidráulica de las unidades identificadas .....	110
3.6.	MINERALIZACION .....	111

3.6.1.	Estructuras mineralizadas .....	112
CAPÍTULO IV : METODOLOGIA E INVESTIGACIONES GEOTECNICAS		
COMPLEMENTARIAS .....		
4.1.	LOGUEO GEOTECNICO DE SONDAJES DIAMANTINOS .....	116
4.1.1.	Índice Q de Barton.....	117
4.2.	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	117
4.2.1.	Propiedades Físicas.....	118
4.2.2.	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple (Uniaxial).....	118
4.2.3.	Ensayo de carga puntual .....	119
4.2.4.	Ensayo de Martillo Schmidt o con esclerómetro .....	119
4.3.	MAPEO GEOMECANICO SUBTERRANEO CON EL METODO DE CELDAS... .....	120
CAPÍTULO V : ANALISIS E INTERPRETACION .....		
5.1.	MODELO GEOMECANICO .....	121
5.1.1.	Análisis de consistencia de las muestras.....	121
5.1.2.	Análisis exploratorio de datos (AED).....	123
5.1.3.	Validación de datos.....	124
5.1.4.	Análisis del variograma .....	133
5.1.5.	Plan de Krigging .....	139
5.2.	MODELO SISMICO.....	142

5.3.	VALIDACION DEL MODELO DE BLOQUES .....	148
5.3.1.	Validación visual .....	148
5.3.2.	Gráficos de Swath Plots .....	149
5.3.3.	Validación sísmica .....	151
5.4.	PRESENTACION DE LOS RESULTADOS DE LA ESTIMACION.....	153
5.4.1.	Zonificación geomecánica .....	153
5.4.2.	Elección del tipo de sostenimiento .....	155
	CONCLUSIONES.....	158
	RECOMENDACIONES .....	161
	BIBLIOGRAFIA .....	162
	ANEXOS.....	165
	EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS.....	188

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Operacionalización de variables (Fuente: Propia).....	21
Tabla 2.1 Cuadro de varianza y desviación estándar (Salazar, 2018) .....	31
Tabla 2.2 Cuadro de varianza y desviación estándar, respecto a la población y muestra (Salazar, 2018) .....	32
Tabla 3.1 Sistema de discontinuidades estructurales (Rumbo/buzamiento – Dip buzamiento/buzamiento) (Fuente DCR ingenieros, consultor de CHSM).....	104
Tabla 3.2 Unidades hidrogeológicas del área de estudio (Fuente investigaciones Hidroandes Consultores SAC Dic 2016- Feb 2017.y BISA 2010 – 2012) .....	108
Tabla 3.3 Características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Fuente, Pruebas de permeabilidad SVS. Junio 2009. y BISA Julio 2010, y BISA junio 2011) .....	110
Tabla 5.1 Parte de la base de datos de los sondajes de perforación (Fuente: Propia) .....	121
Tabla 5.2 Datos de ensayo sin procesar, Mina Catalina Huanca (Fuente: Propia) .....	124
Tabla 5.3 Top-cut de todos los dominios. (Fuente: Propia) .....	132
Tabla 5.4 Resumen de los variograma y sus ortogonales para todas las estructuras de mina Catalina Huanca. (Fuente: Propia) .....	137
Tabla 5.5 Parámetros de búsqueda de las estructuras mineralizadas de la mina Catalina Huanca. (Fuente: Propia).....	138
Tabla 5.6 Diseño de excavación (Fuente: Propia).....	153
Tabla 5.7. Tipo de sostenimiento según RMR Fuente: propia .....	156

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Relación de la media, la mediana y la moda con el sesgo (Salazar, 2018).....	34
Figura 2.2 Apuntamiento de las distribuciones (Salazar, 2018).....	35
Figura 2.3 Variable regionalizada en un espacio unidimensional. Por ejemplo, podría representar la concentración de una contaminante medida a lo largo del tiempo en una estación de monitoreo (Emery, 2013).....	37
Figura 2.4 Histogramas de leyes de cobre medidas sobre tres soportes distintos (bloques de 1m×1m, 5m×5m y 25m×25m) (Emery, 2013).....	38
Figura 2.5 Diagrama de caja para un grupo de datos con concentraciones de elementos. (Emery, 2013).....	43
Figura 2.6 Histograma acumulado desagrupado de las concentraciones de cobalto (en ppm). (Emery, 2013).....	44
Figura 2.7 Gráfico de probabilidad normal para las concentraciones de cobalto. Note que la escala del eje de ordenada (frecuencia acumulada) ya no es aritmética. (Emery, 2013).....	45
Figura 2.8 Ejemplo de función de distribución y densidad de probabilidad univariable. La densidad de probabilidad se obtiene al derivar la función de distribución. (Emery, 2013).....	48
Figura 2.9 Ejemplo de función de distribución y densidad de probabilidad bivariable. La densidad de probabilidad se obtiene al tomar las derivadas parciales de la función de distribución con respecto a cada uno de sus argumentos. (Emery, 2013).....	48
Figura 2.10 Esquema sintético de los conceptos e hipótesis que sustentan el modelo geoestadístico. (Emery, 2013).....	50
Figura 2.11 Semivariogramas direccionales y mapas de semivariogramas para detectar e identificar direcciones de anisotropía. Ambos metales (Ni, Co) presentan una estructura	

isotrópica de corto alcance, mientras que hay una mejor continuidad espacial de largo alcance (valores de semivariograma mas pequeños) para las concentraciones de Co en la dirección SW-NE. Esta mejor continuidad en la dirección SW-NE (línea negrita) es evidente en el mapa de semivariogramas. (Isaaks y Srivastava, 1989) .....51

    Figura 2.12 Tolerancia alrededor de h (Emery, 2013) .....56

    Figura 2.13 Variograma experimental omnidireccional de las concentraciones de cobalto. Las líneas punteadas solo unen a los distintos puntos del variograma experimental. muestra un variograma experimental de las concentraciones de cobalto procedentes de los datos de contaminación de suelo. Este variograma ha sido calculado para distancias múltiplos de la malla de muestreo (0.25 km), con una tolerancia en la distancia de 0.125 km y una tolerancia angular de 90°, es decir, sin importar la orientación del vector h. En este caso se habla de variograma “omnidireccional”. (Emery, 2013) .....57

    Figura 2.14 Dos modelos que se ajustan igualmente bien al semivariograma experimental para concentraciones de Cr. El primer modelo (izquierda) es más parsimonioso en el sentido de que solo están involucradas dos estructuras básicas: un efecto pepita y un modelo esférico. Para la interpolación, tal modelo sería preferible al segundo modelo (derecha), que incluye tres estructuras básicas: un efecto pepita y dos modelos exponenciales. (Emery, 2013) .....58

    Figura 2.15 Mapa variográfico (izquierda) y variograma experimental calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas (N60°E y N30°W) (derecha) (Emery, 2013) .....59

    Figura 2.16 Relación entre la regularidad espacial de una variable regionalizada (arriba) y el comportamiento en el origen del variograma (abajo) (Emery, 2013) .....61

    Figura 2.17 Variograma con meseta y alcance (Emery, 2013) .....62

    Figura 2.18 Variograma sin meseta (Emery, 2013) .....62

Figura 2.19 Variable regionalizada con dirección preferencial de continuidad (izquierda) y variograma en las direcciones de mayor y menor continuidad (derecha) (Emery, 2013).....	63
Figura 2.20 Variograma pepítico (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013).....	64
Figura 2.21 Génesis de un efecto pepita (Emery, 2013) .....	64
Figura 2.22 Ejemplo (2D) de anisotropía geométrica de razón a/b y ángulo $\theta$ . Izquierda: elipse de alcances. Derecha: variograma en las direcciones principales de anisotropía. (Emery, 2013) .	68
Figura 2.23 Semivariograma direccional experimental $C_o$ y el modelo anisotrópico ajustado. Las menor y mayor direcciones de anisotropía son N 67.5 E y N 157.5 E. (Kitanidis, 1996) .....	68
Figura 2.24 Ejemplo (3D) de anisotropía zonal en dirección vertical. Derecha: variogramas en las direcciones horizontales (D1, D2), vertical (D3) y una dirección oblicua (D $\theta$ ) (Emery, 2013). .....	69
Figura 2.25 Ponderación obtenida con la interpolación por el más cercano vecino. (Emery, 2013).....	71
Figura 2.26 Ponderación obtenida con la interpolación por inverso de la distancia (izquierda) e inverso del cuadrado de la distancia (derecha). (Emery, 2013) .....	72
Figura 2.27 Grafico del índice de energía (Van Aswegen y Butler, 1993).....	80
Figura 3.1 Geología Regional. (Fuente CIA Catalina Huanca 2021).....	91
Figura 3.2 Geología local (Fuente CIA Catalina Huanca 2021) .....	96
Figura 5.1 Generación de sondajes en 3D, tomando como base archivos de collar, survey y geomecánica (RMR) (Fuente: Propia) .....	122
Figura 5.2 Archivo “.rm” que reporta errores en la data de sondajes (no figura ninguno, por lo que se valida que la data está correctamente ingresada). (Fuente: Propia).....	123



Figura 5.3 Histograma de sondajes geomecánicos sin compositar donde se observa que la moda es de 1.0 m. (Fuente: Propia).....	125
Figura 5.4 Parámetros de composición (Fuente: Propia).....	125
Figura 2.5 Histograma de los sondajes geomecánicos luego de la composición, longitud de composito igual a 1.0, longitud mínima de composito igual a 0.5. (Fuente: Propia).....	126
Figura 5.6 a) Solido del cuerpo Melissa (proporcionado por el área de geología) b) extensión del solido en 30m, para analizar la roca encajonante. Sondajes con valores RMR aparecen en ambas imágenes. (Fuente: Propia) .....	127
Figura 5.7 Definición del valor de corte en Arenisca para Mariela 4, como tiene muy poca densidad de muestras y todas tienen valores similares (comportamiento lineal), no se aplica un corte. (Fuente: Propia).....	129
Figura 5.8 Definición del valor de corte en Brecha para Mariela 4, X=21.80 (Fuente: Propia) .....	129
Figura 5.9 Definición del valor de corte en Caliza para Mariela 4, como tiene muy poca densidad de muestras y todas tienen valores similares (comportamiento lineal), no se aplica un corte. (Fuente: Propia).....	130
Figura 5.10 Definición del valor de corte en Conglomerado polimictico para Mariela 4, X=51.30 (Fuente: Propia).....	130
Figura 5.11 Definición del valor de corte en Fallas para Mariela 4, X=17.90 (Fuente: Propia) .....	131
Figura 5.12 Definición del valor de corte en Porfido para Mariela 4, X=58.10 (Fuente: Propia) .....	131
Figura 5.13 Definición del valor de corte en Estructura mineralizada para Mariela 4, X=48.70 (Fuente: Propia).....	132

Figura 5.14 División de dominios según control litológico. (Fuente: Propia) .....	134
Figura 5.15 Generación del plano de rotación en los 3 ejes (Fuente: Propia).....	135
Figura 5.16 Generación de variogramas con referencia al plano de rotación (Fuente: Propia) .....	135
Figura 5.17 Variograma omnidireccional, con el ajuste de la meseta, origen y nodos en la estructura de Mariela 4, dominio conglomerado. (Fuente: Propia).....	136
Figura 5.18 Análisis unitario de variogramas (Fuente: Propia) .....	136
Figura 5.19 Modelo del variograma de valores RMR, estructura Mariela 4. (Fuente: Propia) .....	137
Figura 5.20 Elipsoide de búsqueda resultante para el dominio de caliza en la estructura de Mariela 4. (Fuente: Propia) .....	138
Figura 5.21 Estimación de Modelo de Bloques de RMR, estructura Mariela 4. (Fuente: Propia) .....	140
Figura 5.22 Modelo de Bloques de RMR, estructura Mariela 4, sección E-W. (Fuente: Propia) .....	141
Figura 5.23 Información que contiene cada bloque del modelo. (Fuente: Propia) .....	142
Figura 5.24 Data de eventos normales procesados por el sistema microsísmico del IMS-CH. (Fuente: Propia).....	143
Figura 5.25 Eventos microsísmicos registrados dentro de CH, vista en planta. (Fuente: Propia) .....	144
Figura 5.26 Eventos microsismicos registrados dentro de CH, vista W-E. (Fuente: Propia) .	144
Figura 5.27 Índice de energía. (Fuente: Propia).....	145
Figura 5.28 Índices de energía de los eventos y su magnitud local, vista en planta. (Fuente: Propia).....	146

Figura 5.29 Índices de energía de los eventos y su magnitud local, vista W-E. (Fuente: Propia)	146
Figura 5.30 Modelo sísmico de índices de energía del cuerpo Mariela 4. (Fuente: Propia) ...	147
Figura 5.31 Validación visual, sección transversal se observa la concordancia de los bloques del modelo con los sondajes (líneas de color resaltante). (Fuente: Propia) .....	148
Figura 5.32 SWATH PLOT en eje X, donde rojo es la estimación del vecino más cerca, blanco estimación por inverso a la distancia y naranja estimación de kriging ordinario. (Fuente: Propia)	150
Figura 5.33 SWATH PLOT en eje Y. (Fuente: Propia) .....	150
Figura 5.34 SWATH PLOT en eje Z. (Fuente: Propia) .....	151
Figura 5.35 Validación sísmica del modelo geomecánico - Mariela 4. (Fuente: Propia) .....	152
Figura 5.36 Validación sísmica del modelo geomecánico - Mariela 4 (Fuente: Propia) .....	153
Figura 5.37 Mapa geomecánico con estimación del modelo de bloques en zonas de avance programado. (Fuente: Propia) .....	154
Figura 5.38. Sostenimiento permanente e índice Q (Carvajal, 2008).....	157

## RESUMEN

La presente tesis aborda la importancia que tiene el desarrollar modelos geomecánicos 3D como parte de la etapa de estudio y la ejecución de dicho proyecto. Tradicionalmente las características de calidad del macizo rocoso en donde se llevará a cabo las labores subterráneas se hacen con la toma de datos y análisis de fallas geológicas, diaclasas y brechas, pero en macizos rocosos de carácter heterogéneo, como es la realidad común, y el caso de la mina subterránea Catalina Huanca, sumado a su complejidad geológica característica, la determinación de los parámetros geomecánicos está sujeta a altas incertidumbres debido a su complejidad.

El presente trabajo propone hacer uso de los sondajes de perforación realizados a lo largo de la vida útil del yacimiento, para obtener información básica como la valoración RQD, resistencia a la compresión uniaxial y en conjunto con los análisis planteados por Bartón, Bienawsky, y otros, hacer posible una correlación con la calidad del macizo rocoso.

Finalmente, en base a esta información desarrollar un modelo geomecánico 3D del macizo rocoso haciendo uso de herramientas geoestadísticas, buscando obtener zonificaciones en base a la calidad del macizo rocoso utilizando la clasificación de RMR<sub>89</sub>. Entonces, analizando adecuadamente estos datos, se puede proporcionar información más valiosa para utilizarla en realidades donde el reconocimiento sobre el macizo rocoso es bastante limitado.

### **Palabras clave:**

Macizo rocoso, caracterización geomecánica, geoestadística, modelamiento y estimación geomecánica.

## ABSTRACT

This thesis deal the importance of developing 3D geomechanical models as part of the study stage and the execution of said project. Traditionally, the quality characteristics of the rock massif where the underground work will be developed, are made with the geological interpretation of the faults, breccia and joints, but in heterogeneous rock masses, as is the case of the Catalina Huanca underground mine, due to the inherent geological complexity, the determination of geomechanical parameters is subject to high uncertainties due to its complexity.

This work proposes to make use of the drilling carried out throughout the useful life of the mine, to obtain basic information such as the RQD assessment, resistance to uniaxial compression and in conjunction with the analyzes proposed by Bartón, Bienawsky, and others, make possible a correlation with the quality of the rock massif.

Finally, based on this information, develop a 3D geomechanical model of the rock massif using geostatistical tools, attempt to obtain zoning based on the quality of the rock massif using the RMR<sub>89</sub> classification. Then, by properly analyzing this data, more valuable information can be provided for use in realities where recognition of the rock massif is quite limited.

### **Keyword:**

Rock massif, geomechanical characterization, geostatistics, geomechanical modeling and estimation.

# CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES

## 1.1. UBICACION Y ACCESIBILIDAD

La mina Catalina Huanca se ubica en las estribaciones de la Cordillera Occidental de los Andes, en la región central del Perú. Políticamente, pertenece al distrito de Canarias, provincia de Víctor Fajardo, departamento de Ayacucho, a una altitud de 3,500 m s. n. m. Sus coordenadas UTM son 8,454,200 de latitud norte y 615,200 de longitud este.

A la unidad minera se puede acceder a través de dos rutas: la primera y más usada es la ruta Lima-Nazca-Pampa Galeras-Mina, con una longitud total de 715 km; y la segunda es la ruta Lima-Pisco-Ayacucho-Cangallo-Mina, con una longitud total de 1,022 km.

La Mina y alrededores presentan un relieve moderado, con cumbres agrestes y profundos valles en “V” como consecuencia de la intensa erosión fluvial, con elevaciones de hasta 4,000 a 4,500 msnm. (Ver fig. 1.1).

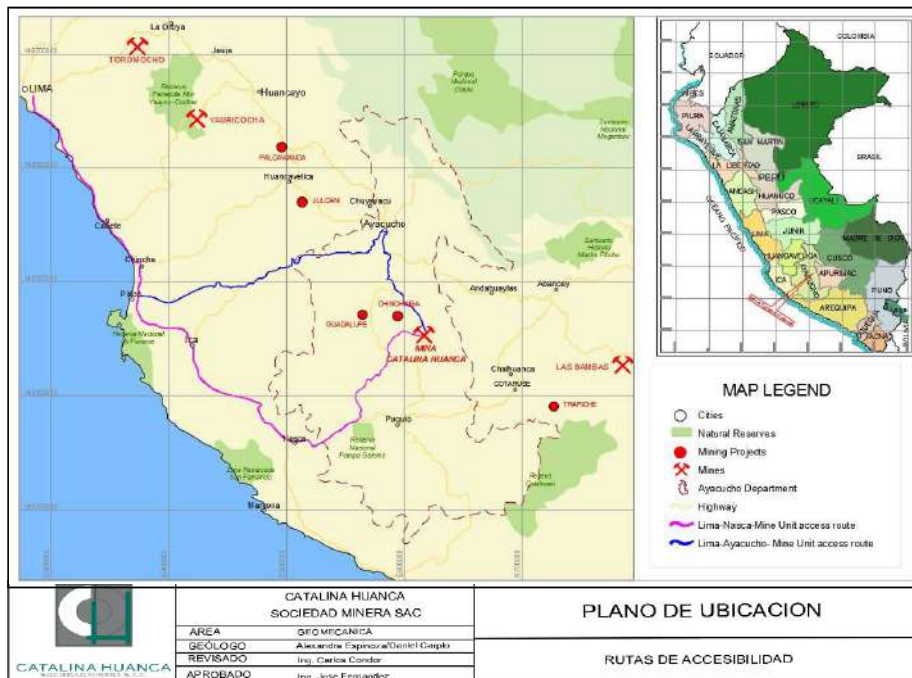


Figura 1.1 Ubicación de mina Catalina Huanca (Fuente CIA Catalina Huanca 2021)

## **1.2. INTRODUCCION**

Se van generando proyectos de desarrollo a lo largo de la vida útil de toda actividad minera mina con el fin de prolongar sus actividades, mejorar la capacidad de producción, entre otras cosas. Para cumplir este objetivo es necesaria una evaluación de las condiciones litológicas y geomecánicas (parámetros geomecánicos) con adecuadas medidas de control que permitan su factibilidad. En esta etapa, la determinación de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso es crucial, pero todavía está sujeta a ciertas incertidumbres en relación con las condiciones geológicas y geomecánicas. La determinación más certera de dichos parámetros geomecánicos es esencial para determinar el tipo de sostenimiento a emplear, junto con un diseño eficiente y económicamente sustentable de las labores subterráneas.

## **1.3. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo la elaboración de los modelos geomecánicos 3D puede reducir la incertidumbre del macizo rocoso, para la evaluación de un diseño de sostenimiento eficiente y económico de las labores subterráneas?

### **1.3.2. Problemas específicos**

a. ¿Cuál es la caracterización RMR<sub>89</sub> de los datos de mapeos geomecánicos y campañas de perforación?

b. ¿Cuál es el proceso por seguir para emplear la técnica geoestadística para crear modelos geomecánicos 3D?

c. ¿Cuál es el criterio para validar los resultados obtenidos de la estimación geoestadística y la base de datos original por cada dominio según la distribución de valores RMR<sub>89</sub>?

## **1.4. HIPOTESIS**

### **1.4.1. Hipótesis general**

La generación de modelos geomecánicos 3D utilizando técnicas geoestadísticas, podrá reducir significativamente la incertidumbre en la predicción del comportamiento del macizo rocoso.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

a. Los datos provenientes de las campañas de perforación y mapeos geomecánicos se pueden representar de acuerdo con la caracterización RMR<sub>89</sub>.

b. La obtención de modelos geomecánicos 3D, se pueden obtener siguiendo un procedimiento de análisis estadístico y geoestadístico de datos georreferenciados.

c. Cuando los modelos geomecánicos 3D, que se obtuvieron para cada zona de estudio, se someta a un proceso de validación visual, ya sea por gráficos de Swath Plots y/o modelos sísmicos, adquirirán un nivel de certeza confiable para ser utilizado como parte de las operaciones mineras.

## **1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **1.5.1. Objetivo general**

Desarrollar modelos geomecánicos 3D, para reducir la incertidumbre del comportamiento del macizo en yacimientos polimetálicos tipo cordilleranos, en base al RMR<sub>89</sub>.



### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las muestras obtenidas de los sondajes de perforación diamantina mediante el logueo geotécnico para elaborar un modelo a partir del RMR<sub>89</sub>.
- Inspeccionar y registrar los parámetros geomecánicos de los mapas geomecánicos de la información recopilada en campo.
- Analizar los parámetros estadísticos y geoestadísticos para la generación de modelos geomecánicos 3D.
- Zonificar los dominios de la calidad del macizo rocoso para definir el tipo sostenimiento a emplear basado en los modelos geomecánicos 3D.
- Realizar la validación del modelo geomecánico 3D.

### **1.6. JUSTIFICACION**

Como es sabido, la incertidumbre de la calidad del macizo rocoso en las etapas previas dificulta considerablemente la realización de una evaluación de prefactibilidad precisa. Este trabajo propone complementar los análisis geomecánicos mediante el modelamiento 3D, con el fin de determinar la calidad del macizo rocoso. Este análisis influye directamente en el alcance de las actividades rutinarias, como es un sostenimiento funcional, el adecuado diseño de labores, definir y optimizar los métodos de minado a aplicar, y la selección apropiada de equipos y materiales. Esto permite ajustar el presupuesto del proyecto utilizando la información disponible en la empresa para maximizar su provecho, centrándose especialmente en la calidad del macizo, según lo determinado por testigos recuperados en sondajes exploratorios, infill y mapeos geomecánicos en 2D.

En resumen, durante el desarrollo de las labores subterráneas, se lleva a cabo un control rutinario por parte del área de geomecánica. Al incrementar la información obtenida del modelo

geomecánico 3D, se tiene como objetivo minimizar la incertidumbre en el comportamiento del macizo rocoso. De esta forma, se podrá proponer las zonas más favorables para el desarrollo de las labores subterráneas, y definir con antelación el método de sostenimiento más eficiente. Todo este proceso evidencia una mejora en el presupuesto del sostenimiento y mejoras en el tiempo de desarrollo de la mina.

## 1.7. VARIABLES

	Naturalización	Indicadores	Escala de medición	Instrumentos	Criterio de medición de las categorías (datos)
Variable Independiente	Cualitativo	Litología	Nominal	Mapeo geológico	Arenisca
					Caliza
Macizo Rocosos	Cuantitativo	Clasificación geomecánica	Ordinal	Clasificación RMR según Bieniawski (1989)	Conglomerado
					Falla
Variable Dependiente	Cuantitativo	Análisis geoestadístico	Ordinal	Software Studio RM Datamine	Mineral
					Estimación RMR mediante Krigging Ordinario
Modelo Geomecánico	Cuantitativo	Eventos microsísmicos	Ordinal	Software Vantage & Trace	Buena (II) (61-80)
					Índices de energía
					Regular (III-A) (51-60)
					Regular (III-B) (41-50)
					Mala (IV-A) (31-40)
					Mala (IV-B) (21-30)
					Muy mala (V) (< 20)

Tabla 1.1. Operacionalización de variables (Fuente: Propia)

## CAPÍTULO II : MARCO TEORICO

Los datos de las ciencias de la tierra se distribuyen típicamente en el espacio y/o en el tiempo. El conocimiento de un atributo, digamos, tipo de litología, una ley mineral o calidad de roca, es por lo tanto de poco interés a menos que la ubicación y/o el momento de la medición se conozcan y se tengan en cuenta en el análisis de datos. La geoestadística proporciona un conjunto de herramientas estadísticas para incorporar las coordenadas espaciales y temporales de las observaciones en el procesamiento de datos. La geoestadística se utiliza cada vez más para modelar la incertidumbre sobre valores desconocidos a través de la generación de valores alternativos (realizaciones) que respetan los datos y reproducen aspectos de los patrones de dependencia espacial u otras estadísticas consideradas como consecuencia del problema en cuestión. (Bardossy, 2000)

Debido a que la mayoría de los entornos subterráneos son complejos, incluso una vasta cantidad de datos no es suficiente para resolver con precisión la distribución de las propiedades que gobiernan estos. Sin embargo, la comprensión del proceso es en sí incompleta y no puede producir una respuesta única o precisa. Los métodos de estimación estadística complementan la comprensión del proceso y pueden acercarnos a una respuesta que es útil para tomar decisiones racionales. Su principal contribución es que sugieren cómo tratar los datos para calcular las mejores estimaciones y los límites de error mínimo en estas estimaciones. La estadística se ha descrito acertadamente como una guía hacia lo desconocido; un enfoque para hacer inferencias sobre una cantidad no medida. El propósito de esta tesis es proporcionar algunas ideas sobre esta metodología al mismo tiempo que describe herramientas útiles para resolver problemas de estimación encontrados en la práctica. (Kitanidis, 1996)

## **2.1. ESTADISTICA**

La palabra estadística (singular) se refiere a una metodología para la organización, análisis y presentación de datos. En particular, el modelado estadístico es un enfoque para ajustar ecuaciones matemáticas a los datos con el fin de predecir los valores de cantidades desconocidas a partir de mediciones, para lo cual es conveniente subdividir la metodología en los siguientes pasos:

- Postular un modelo que describa la variabilidad de los datos y pueda ser utilizado para extrapolar de los datos conocidos a lo desconocido.
- Si el modelo involucra parámetros indeterminados, estos parámetros se estiman o ajustan.
- El modelo se pone a prueba o se valida.
- Si el modelo se considera aceptable, se utiliza para predecir lo desconocido.

El modelo postulado es probabilístico. El ajuste de parámetros, la validación del modelo y la predicción implican cálculos de distribuciones de probabilidad o momentos (como la media, la varianza, etc.). Estos modelos deben ser razonablemente simples; de lo contrario, los cálculos pueden ser demasiado complicados para que el enfoque sea de utilidad práctica. Los cálculos en los métodos presentados son razonablemente simples y solo involucran valores medios, varianzas y coeficientes de correlación. (Kitanidis, 1996)

### **2.1.1. Conceptos básicos**

#### **2.1.1.1. Población**

Es el conjunto de todos los elementos que presentan una característica común determinada, observable y medible. Por ejemplo, si el elemento es la roca, se puede estudiar las características,

cantidad, elementos, concentración de elementos, calidad de roca, propiedades física y mecánica, etc. Las características de la población se resumen en valores llamados parámetros. (Porras, 2014)

#### **2.1.1.2. Muestra**

La mayoría de los estudios estadísticos, se realizan no sobre la población, sino sobre un subconjunto o una parte de ella, llamado muestra, partiendo del supuesto de que este subconjunto presenta el mismo comportamiento y características que la población. En general el tamaño de la muestra es mucho menor al tamaño de la población. Los valores o índices que se concluyen de una muestra se llaman estadígrafos y estos mediante métodos inferenciales o probabilísticos, se aproximan a los parámetros poblacionales. (Porras, 2014)

#### **2.1.1.3. Variable**

Se llama variable a una característica que se observa en una población o muestra, a la cual se desea estudiar. La variable puede tomar diferentes valores dependiendo de cada unidad. Una variable se puede clasificar en variable cuantitativa (aquella que toma valores numéricos) o variable cualitativa (aquella que describe cualidades, no numéricas) (Porras, 2014)

#### **2.1.1.4. Variabilidad**

La mayoría de los fenómenos naturales que estudiamos son variables tanto en el espacio como en el tiempo. Considerando una superficie topográfica, se puede observar una alta variabilidad en pequeñas distancias. La variabilidad es el resultado de procesos naturales, por lo tanto, determinísticas. Dado que la mayoría de estos procesos son sensibles y las condiciones bajo las cuales tuvieron lugar no se conocen completamente, no es posible describirlos completamente basándose en leyes físicas y químicas. (Porras, 2014)

### **2.1.2. Obtención de los datos**

Gran parte del trabajo de un estadístico se hace con muestras. Estas son necesarias porque las poblaciones son casi siempre demasiado grandes para estudiarlas en su totalidad. Exigiría demasiado tiempo y dinero estudiar la población entera, y tenemos que seleccionar una muestra de esta misma, calcular la estadística de esa muestra y utilizarla para estimar el parámetro correspondiente de la población, sin embargo, la obtención de la información se puede realizar por diversos medios. Una forma es a través del muestreo, otra forma es a través de experimentos donde la respuesta a la variable es el resultado del experimento. En cualquiera de estos casos contamos con una selección de información llamada muestra y que se procede a analizar. (Porras, 2014)

### **2.1.3. Distribución de frecuencias**

Para poder conocer a la población, es común usar una tabla estadística donde se presentan los datos resumidos, de tal manera que se puede en una visión panorámica y establecer un criterio sobre su comportamiento, entendiéndose por comportamiento, la determinación aproximada de los valores centrales, la variabilidad que presentan y si son o no relativamente simétricos con relación a un valor central. En una tabla de frecuencias se pueden resumir cualquier tipo de datos, categóricos (nominales), ordinales, discretos y continuos. (Porras, 2014)

### **2.1.4. Gráficos estadísticos**

Existen muchos gráficos estadísticos, estos son una ayuda visual para conocer el comportamiento de la población, se explica los más utilizados de acuerdo con la variable que se está estudiando. Los principales gráficos estadísticos los podemos resumir en: diagramas de barras o columnas y de dispersión, histogramas, polígonos de frecuencia y ojivas. (Salazar, 2018)

El primer diagrama es utilizado para variables cualitativas y también para cuantitativas. Para estudiar el comportamiento de variables en el tiempo; el diagrama de dispersión es usado para analizar la relación de dos variables (correlación, regresión) y finalmente los tres últimos diagramas se usan para representar a datos categorizados mediante intervalos. (Salazar, 2018)

#### **2.1.4.1. Diagrama de barras o columnas**

Es un tipo de gráfico que constan de dos ejes, de los cuales se escoge a uno de ellos para representar a la variable de estudio de acuerdo con la distribución de frecuencias generada y el otro para representar la frecuencia de cada categoría, si es el eje vertical en el que se marcan las frecuencias el diagrama será de columnas, por el contrario, si es en el eje horizontal donde se representan las frecuencias, el diagrama será de barras. En este diagrama, bien, la altura de las columnas o la longitud de las barras, vienen establecidas por la frecuencia de cada categoría. Existen otras posibilidades para estos diagramas, como columnas apiladas y columnas apiladas al 100%. (Salazar, 2018)

#### **2.1.4.2. Diagrama de dispersión**

Es un gráfico que nos permite visualizar la relación entre dos variables de estudio, una con carácter de variable independiente y la otra dependiente de la primera, la representación sigue la convención establecida que, la variable independiente se ubicará en el eje horizontal y la dependiente en el eje vertical. Normalmente se presentan los valores como puntos ubicados en el plano, es recomendable no unir los puntos mediante segmentos. (Salazar, 2018)

#### **2.1.4.3. Histograma**

En esencia es un gráfico compuesto por una sucesión de rectángulos adyacentes, cada uno de los cuales representa a una categoría, con la condición de que el área de cada uno de ellos es igual

o proporcional a la frecuencia de la categoría que representa. La variable de estudio se ubica en el eje horizontal y la frecuencia de clase (absoluta, relativa o porcentual) se ubica en el eje vertical. (Salazar, 2018)

#### **2.1.4.4. Polígono de frecuencias**

“Consiste en un diagrama de segmentos rectos articulados en los puntos que se generan al ubicar en el plano a cada marca de clase con su respectiva frecuencia ( $x$ ,  $f$ ). La variable de estudio se ubica en el eje horizontal (representada por las marcas de clase) y la frecuencia de clase en el eje vertical. El gráfico se concluye cuando se cierra el polígono con el eje horizontal.” (Salazar, 2018)

#### **2.1.4.5. Ojivas o polígono de frecuencias acumulada**

Constituye un gráfico de tipo lineal que forma una línea poligonal abierta. Está representado por los segmentos rectos que se unen secuencialmente en los puntos que se generan al relacionar los límites inferior o superior de cada categoría con las respectivas frecuencias acumuladas “menor que” o “mayor que”. (Salazar, 2018)

### **2.1.5. Medidas de tendencia central**

Al describir grupos de observaciones, con frecuencia es conveniente resumir la información con un solo número. Este número que, para tal fin, suele situarse hacia el centro de la distribución de datos se denomina medida o parámetro de tendencia central o de centralización. Cuando se hace referencia únicamente a la posición de estos parámetros dentro de la distribución, independientemente de que ésta esté más o menos centrada, se habla de estas medidas como medidas de posición para variables cuantitativas, como estas medidas se tiene a la media, mediana y moda. (Salazar, 2018)



### 2.1.5.1. Media Aritmética

Para esta medida vamos a considerar dos alternativas, no porque el concepto y el criterio de cálculo sean diferentes, más bien responde a condiciones sobre, si la media es obtenida de una población o de una muestra, lo único que cambiará es la simbología utilizada para la representación. En general podemos indicar que, la media aritmética es el valor que resulta de dividir la suma de todos los valores observados entre el número de datos considerados, es decir el promedio. (Salazar, 2018)

Representada por la siguiente formula:

$$Media(X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

siendo  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  el conjunto de observaciones

Es necesario señalar que la media aritmética tiene algunas desventajas, entre ellas la principal es que al ser afectada por la presencia de valores extremos (altos o bajos), pierde representatividad del conjunto de datos. (Salazar, 2018)

### 2.1.5.2. Media Aritmética Ponderada

Constituye un caso especial de la media aritmética y ocurre cuando los datos individuales, están categorizados de acuerdo con la frecuencia o factores de ponderación. En estos casos la variable está representada por cada valor observado y los pesos constituyen las frecuencias o los factores de ponderación de cada uno de ellos. (Salazar, 2018)

$$MP = \frac{p_1 X_1 + p_2 X_2 + \dots + p_N X_N}{p_1 + p_2 + \dots + p_N}$$

siendo  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  el conjunto de datos y  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$  los pesos

Representado por la siguiente formula:

### **2.1.5.3. Mediana**

Es el punto medio del total de observaciones, luego de que han sido ordenados y que deja al mismo número de observaciones por debajo de su valor, así como por arriba de él.

La mediana es una importante medida de ubicación, en casos en que la media aritmética no es representativa de un conjunto de datos, esta situación se da cuando existe la presencia de valores extremos altos o bajos, en cuyo caso la mediana proporciona un valor más representativo de la tendencia central. Es básicamente a la determinación del valor medio, existen dos posibilidades, cuando el número de observaciones es impar  $“(n + 1)/2”$  y cuando este número es par  $“(n/2) y (n/2 + 1)”$  y se encuentra la media aritmética de estos valores. (Salazar, 2018)

### **2.1.5.4. Moda**

Es el valor de la observación o elemento que tiene la mayor frecuencia. La moda puede determinarse para cualquier conjunto de datos y al igual que la mediana no se ve afectada por la presencia de valores extremos y puede ser determinada para categorías con intervalos abiertos. Sin embargo, la moda tiene una desventaja, principalmente para datos numéricos y es que muchos estudios no poseen moda no hay elementos con mayor frecuencia o puedan tener varias modas (cuando dos o más elementos tienen la misma mayor frecuencia), dando lugar en este último caso a que los estudios sean bimodales o plurimodales. (Salazar, 2018)

### **2.1.5.5. Centiles (percentiles)**

Los percentiles son, tal vez, las medidas más utilizadas para propósitos de ubicación. Los percentiles son ciertos números que dividen la sucesión de datos ordenados en cien partes porcentualmente iguales. Estos son los 99 valores que dividen en cien partes iguales el conjunto de datos ordenados. (Salazar, 2018)

### **2.1.6. Medidas de dispersión de datos no agrupados**

Estas medidas son necesarias para la mejor comprensión de la distribución de un conjunto de datos y se complementan con las medidas de centralización vistas anteriormente. Recordemos que las medidas de tendencia central localizan generalmente a un valor que se halla ubicado en el centro de la distribución, pero no informa sobre el grado de dispersión o variabilidad del conjunto de datos. El análisis de los resultados de estas medidas también permite comparar los grados de dispersión entre dos o más distribuciones. Las más utilizadas son el rango, la desviación media, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación. (Salazar, 2018)

#### **2.1.6.1. Amplitud de variación (Rango)**

Es la medida más simple de dispersión y se obtiene al establecer la diferencia entre el máximo y el mínimo de los datos cuantitativos. El valor obtenido nos brinda la información en relación con el intervalo entre los valores límites en los que se observaron los datos; su utilización está más ligada al control estadísticos de procesos. Este valor nos permite también comparar con estudios de la misma naturaleza y establecer con buen criterio que el conjunto de datos que tenga el menor rango, será el que tenga menos variabilidad o menor dispersión. (Salazar, 2018)

#### **2.1.6.2. Desviación media**

Es la medida de dispersión que mide más exactamente el grado de dispersión de un conjunto de datos con relación a la media aritmética. En otras palabras, es la medida que nos determina en cuantas unidades en promedio los datos se hallan desviados o alejados de la media aritmética. (Salazar, 2018)

Se calcula mediante la siguiente fórmula, para datos no agrupados.

$$D_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|}{N} = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_N - \bar{x}|}{N}$$

Dónde:  $D_{\bar{x}}$  es la desviación media; N es el número de datos;  $x_N$  es un dato y  $\bar{x}$  media de los datos.

### 2.1.6.3. Desviación estándar (varianza)

Estas dos medidas de dispersión se basan en los cuadrados de las desviaciones de los elementos con relación a la media aritmética y podemos indicar que la varianza es la media aritmética de las desviaciones cuadráticas con relación a la media aritmética general, mientras que la desviación estándar constituye la raíz cuadrada positiva de la varianza. (Salazar, 2018)

Medida	Población	Muestra
Varianza	$\sigma^2$	$S^2$
Desviación Estándar	$\sigma$	S

*Tabla 2.1 Cuadro de varianza y desviación estándar  
(Salazar, 2018)*

La interpretación de la desviación estándar es la misma que se le dio a la desviación media, es decir, proporciona el valor promedio de las desviaciones de los elementos, con relación a la media aritmética; a pesar de que los valores no son iguales. La interpretación para la varianza es una medida muy útil cuando se comparan estudios estadísticos de la misma naturaleza. (Salazar, 2018)

	Varianza	Desviación Estándar
Población	$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}$	$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$
Muestra	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$

Tabla 2.2 Cuadro de varianza y desviación estándar, respecto a la población y muestra (Salazar, 2018)

#### 2.1.6.4. Coeficiente de variación

Se utiliza para hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable. Su fórmula expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, mostrando una interpretación relativa del grado de variabilidad, independiente de la escala de la variable. Pero a diferencia de la desviación estándar este coeficiente es fuertemente sensible ante cambios de origen en la variable. Por ello es importante que todos los valores sean positivos y su media dé, por tanto, un valor positivo. A mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor Cv, mayor homogeneidad en los valores de la variable. (Salazar, 2018)

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \qquad C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

Donde  $\sigma$  es la desviación típica, y  $\bar{x}$  es la Media. Se puede dar en porcentaje también.

#### 2.1.7. Medidas de forma

Son valores que representan o dan a conocer la manera en que los datos se hallan distribuidos con relación a la media aritmética y toman como referente de comparación a la distribución normal o campana de Gauss, en lo que hace relación al sesgo y a la curtosis. (Salazar, 2018)

### 2.1.8. Coeficiente de asimetría

La asimetría o sesgo se hace presente cuando la distribución carece de simetría, debido a la presencia de valores extremos muy bajos o altos. La presencia de estos valores influye en la media aritmética y por lo tanto toma un valor o menor a la mediana o mayor que ella. La expresión que nos permite calcular el valor del coeficiente de asimetría se debe a Karl Pearson (Salazar, 2018).

Quién desarrolló dos expresiones, una de las más utilizadas es la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{3(\bar{x} - Me)}{S} \qquad A_s = \frac{\bar{x} - Mo}{S}$$

Dónde,  $\bar{x}$  es la media aritmética. Mo es la moda. S es la desviación estándar. Me es la mediana.

- $A_s = 0$  Entonces la distribución es simétrica.
- $A_s > 0$  Entonces la distribución es asimétrica hacia la derecha o tiene sesgo positivo.
- $A_s < 0$  Entonces la distribución es asimétrica hacia la izquierda o tiene sesgo negativo.

Si la distribución es simétrica, su coeficiente de asimetría es cero, en vista de que la media aritmética es igual que la mediana. Si la media aritmética es mayor que la mediana, entonces la distribución es asimétrica positiva o tiene sesgo positivo; por el contrario, si la media es menor que la mediana, entonces la distribución tiene sesgo o asimetría negativa. Generalmente el coeficiente de asimetría se halla ubicado en el intervalo entre -3 y +3. Si el valor del coeficiente se acerca a los límites indica que la distribución es muy asimétrica, en cambio, si está próximo a cero se trata de una distribución que tiende a ser simétrica. (Salazar, 2018)

### 2.1.9. Relación de la media, la mediana y la moda con el sesgo

En la siguiente figura se observa como las medidas de centralización se relacionan entre sí, y con la asimetría de la distribución. Si las tres medidas son iguales la distribución no tiene sesgo; si:  $\text{media} < \text{mediana} < \text{moda}$ , la distribución es asimétrica negativa y si:  $\text{media} > \text{mediana} > \text{moda}$ , la distribución tiene sesgo positivo. (Salazar, 2018)

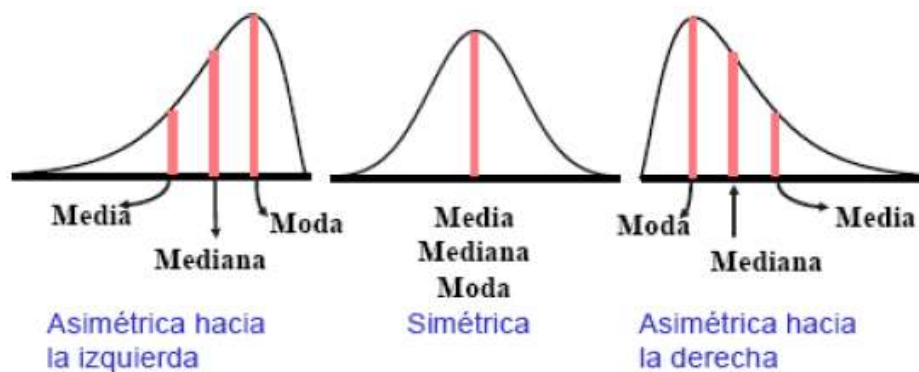
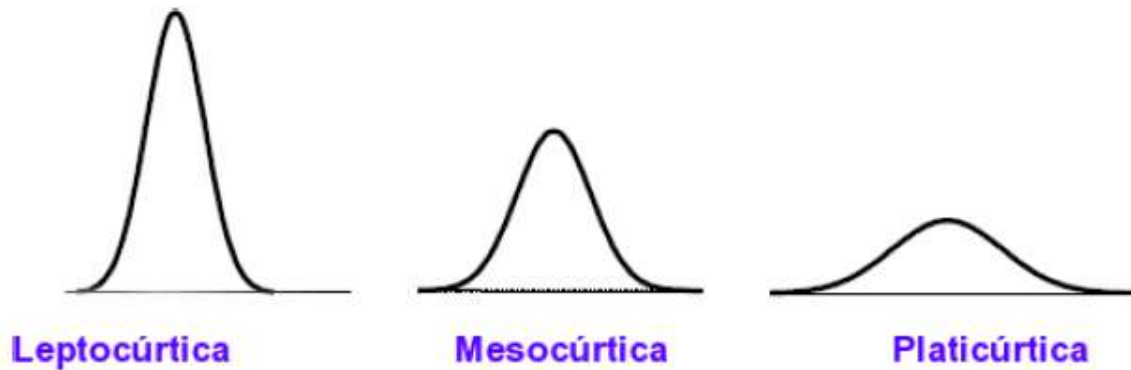


Figura 2II.1 Relación de la media, la mediana y la moda con el sesgo (Salazar, 2018)

### 2.1.10. Curtosis

Se encarga de describir el grado de apuntamiento que tiene una distribución, considerando a la distribución normal como referente de comparación; las más altas y que no tienen muchos datos dispersos en las colas, toman el nombre de leptocúrticas, en cambio aquellas que son más bien aplanadas por disponer de datos más dispersos hacia las colas toman el nombre de platicúrticas y aquellas que tienen un apuntamiento como la distribución normal, se denominan mesocúrticas. La medida que determina este apuntamiento se denomina curtosis, la expresión de cálculo que determina el valor de la misma está dado por una expresión que relaciona las desviaciones de cuarto grado de los elementos con la cuarta potencia de la desviación estándar. (Salazar, 2018)



*Figura 2.2 Apuntamiento de las distribuciones (Salazar, 2018)*

## **2.2. METODOS ESTOCASTICOS**

No es raro utilizar métodos probabilísticos y estadísticos para describir parámetros naturales parcialmente conocidos (o muestreados). Pero en la realidad geológica, el problema más restrictivo es la singularidad de la realización. Se puede lanzar una moneda varias veces, pero no se puede repetir un fenómeno natural. Esto significa que no hay frecuencias disponibles y, por lo tanto, las probabilidades no se pueden evaluar de esta manera. Los valores de medición de un determinado parámetro, obtenidos de diferentes ubicaciones, a menudo se tratan como resultados diferentes de la misma variable aleatoria. De esta forma se calculan las medias y las variaciones, las distribuciones acumuladas, etc. (Bardossy, 2000)

## **2.3. GEOESTADISTICA**

El análisis de series de tiempo es uno de los primeros campos donde se ha considerado y descrito la variabilidad con métodos estocásticos. Estos métodos se ampliaron y desarrollaron aún más para analizar la variabilidad espacial. Estos métodos espaciales forman la disciplina llamada geoestadística. La palabra geoestadística se forma a partir de las dos partes “geo” y “estadística” de manera similar a la geofísica o la geoquímica. (Bardossy, 2000).



### **2.3.1. Estimación**

En los años sesenta, el matemático francés G. Matheron dio fundamentos teóricos a los métodos anteriores. “La geoestadística fue utilizada por primera vez por la industria minera, ya que los altos costos de las perforaciones hicieron que el análisis de los datos fuera extremadamente importante. Las aplicaciones de la geoestadística se pueden encontrar en disciplinas muy diferentes que van desde los campos clásicos de minería y geología hasta ciencias del suelo, hidrología, meteorología, ciencias ambientales, agricultura e incluso estructuras.” (Bardossy, 2000)

### **2.3.2. Variable regionalizada**

La geoestadística se define como el estudio de fenómenos regionalizados, es decir, que se extienden en el espacio y presentan una cierta continuidad. Por “espacio”, entenderemos en general el espacio geográfico, pero puede también tratarse del eje temporal o de espacios más abstractos. El objeto sobre el cual trabajaremos será una descripción matemática del fenómeno regionalizado, a saber, una o varias funciones numéricas llamadas variables regionalizadas, que miden ciertas propiedades o atributos relacionados con este fenómeno. (Emery, 2013) Por ejemplo:

- La ley de un mineral, la potencia de una veta, la calidad del macizo rocoso, 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 en nutrientes medidas sobre una muestra de suelo
- El número de árboles y su diámetro promedio en áreas de observación de un bosque.

Según Emery (2013), “una variable regionalizada es una función determinística. En general, esta función presenta dos aspectos complementarios: por una parte, tiene una cierta continuidad espacial (zonas de altos valores / zonas de bajos valores), pero, por otro lado, varía irregularmente y escapa a toda representación simple (Figura 3.3)”.

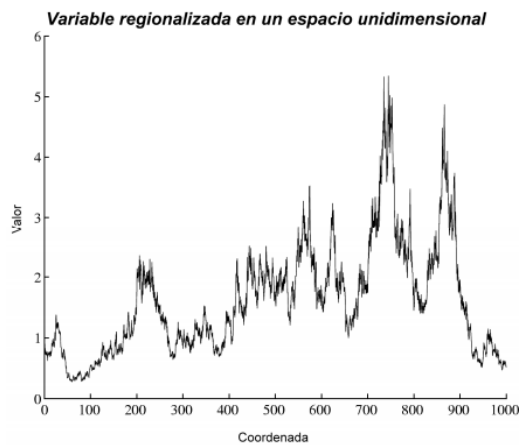


Figura 2.3 Variable regionalizada en un espacio unidimensional. Por ejemplo, podría representar la concentración de una contaminante medida a lo largo del tiempo en una estación de monitoreo (Emery, 2013)

En la teoría de variables regionalizadas, el concepto de funciones aleatorias juega un papel central y una función aleatoria es un conjunto de variables aleatorias correspondientes a los puntos del dominio en estudio. Esto significa que para cada punto en el dominio habrá una variable aleatoria correspondiente. Esta interpretación de los parámetros naturales reconoce el hecho de que no es posible describirlos completamente utilizando únicamente métodos deterministas. En la mayoría de los casos, es imposible comprobar el supuesto de que el parámetro es la realización de una función aleatoria, ya que tenemos que tratar con una única realización. Se podría describir una función aleatoria por sus funciones de distribución multidimensionales. (Emery, 2013)

### 2.3.2.1. Noción de soporte

Una variable regionalizada puede definirse, no sólo en cada punto del espacio, sino también en una superficie o en un volumen sobre el cual se considera la variable regionalizada, esto se denomina soporte. Esta noción es esencial debido a la dependencia que existe entre el soporte y la distribución estadística de los valores, conocida como efecto de soporte: los soportes voluminosos presentan una menor cantidad de valores extremos y una mayor cantidad de valores intermedios que los soportes puntuales. Así, la distribución de los valores (en especial, su varianza) depende del soporte sobre el cual está definida la variable regionalizada. Este efecto queda ilustrado en la Figura 3.4, que muestra la distribución de la ley de cobre en un yacimiento medida sobre tres soportes distintos. La forma del histograma tiende a simetrizarse cuando aumenta el soporte y que la varianza disminuye, aunque se mantiene constante el valor promedio. (Emery, 2013).

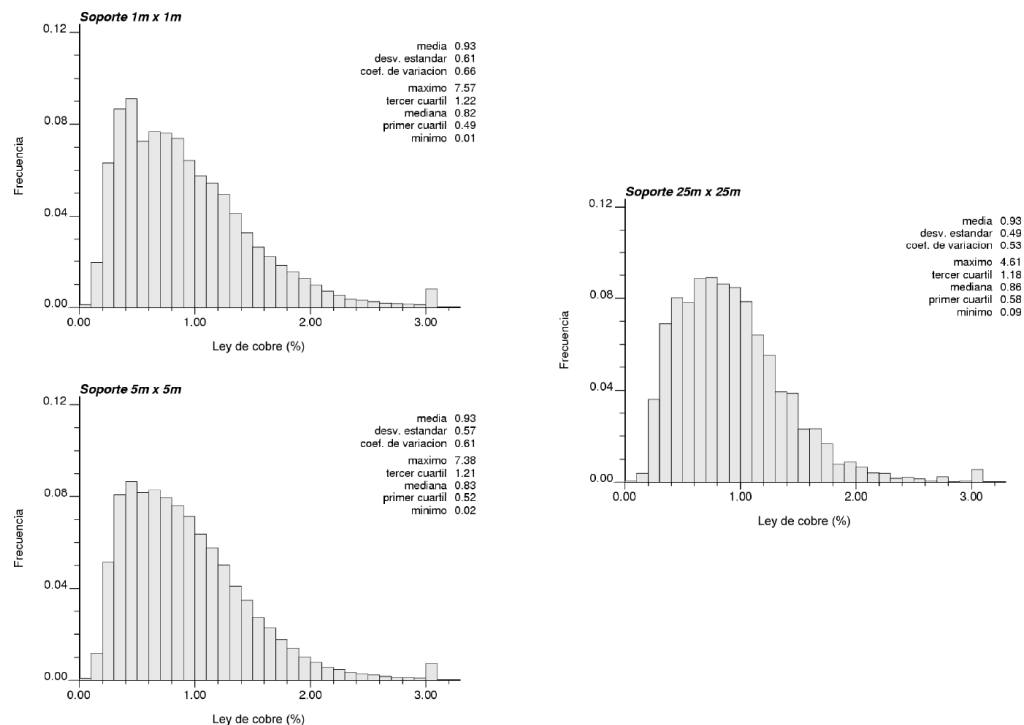


Figura 2.4 Histogramas de leyes de cobre medidas sobre tres soportes distintos (bloques de 1m×1m, 5m×5m y 25m×25m) (Emery, 2013).

### **2.3.3. Datos y modelos**

Normalmente, no se conoce la variable regionalizada en forma exhaustiva, sino que solamente a través de un conjunto limitado de datos (muestras de sondeos en exploración minera, observaciones en terreno en ingeniería forestal, etc.). Para aprovechar la información disponible, más allá de un simple reporte de los datos, será necesario construir modelos. Pero debe tenerse presente que un modelo nunca describe la variable regionalizada en su totalidad, sin simplificación, ni distorsión. El modelamiento y las hipótesis que se requieren aportan más información que aquella contenida en los datos experimentales. En consecuencia, conviene reducir al máximo la complejidad del modelo, evitando introducir parámetros arbitrarios. (Emery, 2013)

### **2.3.4. Criterios de estimación**

La “predicción” o “estimación” constituye un objetivo importante de la geoestadística. Consiste en evaluar, de la manera más precisa posible, un valor que no ha sido medido, a partir de los datos disponibles. Una característica de los métodos geoestadísticos será, no sólo construir estimadores, sino también proporcionar una medida de la precisión de la estimación por medio de herramientas probabilísticas. Se distingue dos tipos de estimaciones: las estimaciones globales y las estimaciones locales. La estimación global busca caracterizar el campo completo por un valor único (por ejemplo, la media de la variable regionalizada en estudio) o por una distribución estadística (histograma). Es poco común que una estimación global sea suficiente; frecuentemente, se requiere completarla con estimaciones locales. En general, se busca evaluar el valor en un sitio que no ha sido muestreado o el valor promedio de un “bloque” cuyo soporte es mayor que el soporte de los datos. En este problema, debe considerarse la continuidad espacial de la variable regionalizada, las distancias entre el sector a estimar y los sitios con datos, así como la configuración espacial de los mismos sitios con datos, puesto que datos agrupados suelen tener

valores parecidos, constituyéndose en información redundante. Otro aspecto de la estimación local es la cuantificación de la incertidumbre en los valores de la variable regionalizada y la probabilidad de que estos valores superen o queden debajo de ciertos límites. Por ejemplo, el geólogo está interesado en conocer los sectores de un área donde los valores de mineral son demasiado bajos, poder diferenciarla. Sin embargo, los problemas de estimación no son los únicos a los que responde la geoestadística. El análisis de la dependencia espacial permite describir la distribución de los valores en el espacio, cuantificar las correlaciones o redundancias de información entre valores medidos en sitios diferentes, determinar el tamaño de la “zona de influencia” de una observación, así como detectar anisotropías que indican que la variable regionalizada tiene direcciones preferenciales de continuidad en el espacio. (Emery, 2013)

### **2.3.5. Estudio exploratorio de datos**

El análisis de datos generalmente comienza trazando los datos y calculando estadísticas que describen características importantes de la muestra. Realizamos un análisis exploratorio de este tipo para familiarizarnos con los datos y detectar patrones de regularidad. Los métodos gráficos son útiles para representar la distribución de las observaciones y su estructura espacial. El análisis exploratorio es realmente un precursor del análisis estadístico. (Emery, 2013)

#### **2.3.5.1. Alcance del análisis exploratorio**

El análisis y la interpretación de datos no pueden ser completamente automatizados, particularmente cuando se toman decisiones cruciales de modelado. El analista debe juzgar y tomar decisiones que requieran estar familiarizado con los datos, el sitio y las preguntas que necesitan respuesta. Se necesita un esfuerzo para familiarizarse con conjuntos de datos que a menudo son voluminosos y describen áreas o procesos complejos. De poco sirve mirar los datos tabulados. Sin

embargo, el ojo humano puede reconocer patrones a partir de presentaciones gráficas de los datos. Es importante observar los datos de muchas formas y tener en cuenta que algunas técnicas favorecen implícitamente un determinado modelo. Durante el análisis exploratorio de datos, se debe hacer la menor cantidad posible de suposiciones. Las conclusiones obtenidas durante el análisis exploratorio son provisionales. Un modelo no puede aceptarse sobre la base de un análisis exploratorio únicamente, sino que debe ser corroborado o probado. (Emery, 2013)

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

- 1) Analizar (mediante herramientas estadísticas simples) la cantidad, la calidad y la ubicación de los datos disponibles.
- 2) Definir la(s) zona(s) de estudio. Una división del campo en varias sub-zonas puede ser relevante si uno observa cambios abruptos en la distribución espacial de valores, o si la geología del fenómeno lo indica.
- 3) Anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local (por ejemplo, presencia de valores atípicos que se destacan de aquellos de los datos vecinos, como valores erráticos) (Emery, 2013)

### **2.3.6. Despliegue de datos (mapas)**

El despliegue de los datos permite visualizar su ubicación en el espacio. Cuando se trabaja en el espacio tridimensional, el despliegue puede hacerse con proyecciones (plantas y secciones) o vistas en perspectiva. Los mapas de datos pueden incluir información sobre los valores medidos y así dar una idea preliminar de la distribución y continuidad espacial de la variable en estudio.

Normalmente los datos están distribuidos según una malla de muestreo regular de un tamaño óptimo dependiendo a cada tipo de estudio. Sin embargo, por diversos motivos, algunos estudios o algunos sectores de la zona de estudio siguen un muestreo aleatorio, o dentro de un muestreo sistemático han sido reconocidas zonas con una mayor cantidad de muestras, constituyéndose algunos agrupamientos (clusters). La presencia de agrupamientos de datos hace que la malla de muestreo sea irregular. Al momento del análisis estadístico, será importante tomar precauciones puesto que los sectores más densamente muestreados podrían tener demasiada importancia y distorsionar las estadísticas sobre los valores reales. Por ejemplo, esto sería el caso si los agrupamientos fueran realizados en los sectores de mayor interés (muestreo preferencial). El mapa de los datos da una primera idea de la distribución de los valores en la zona de estudio. Así se puede distinguir sectores con valores altos y bajos. (Emery, 2013)

### **2.3.7. Desagrupamiento**

Para calcular el histograma y las estadísticas elementales, es frecuente considerar una variable de ponderación o “declustering” a modo de corregir los efectos provocados por las irregularidades de la malla de muestreo. La idea es asignar a los datos espacialmente agrupados, en parte redundantes, un ponderador más pequeño que a los datos aislados, los cuales son representativos de una porción más extensa del campo. Para determinar la variable de ponderación, se puede utilizar el llamado método de las celdas. Esta técnica consiste en dividir la zona de estudio en celdas rectangulares idénticas y en atribuir a cada dato un ponderador inversamente proporcional al número de datos presentes en la celda a la cual pertenece. La puesta en marcha del método requiere definir previamente el tamaño de la celda elemental. Usualmente, se prueba varios tamaños y se examina su impacto en el valor de la media ponderada. Al aumentar la longitud de celda, la media ponderada aumenta, lo que indica que los ponderadores calculados tienden a privilegiar los valores

altos en perjuicio a los valores bajos. Esto es una señal de que la malla de muestreo es más densa en zonas de valores bajos. (Emery, 2013)

El método de las celdas realiza la ponderación de los datos según un criterio meramente “geométrico”, es decir, que sólo toma en cuenta la posición espacial de los datos. No toma en cuenta la continuidad espacial de los valores, aunque este criterio también es digno de ser tomado en consideración. Por ejemplo, si los datos tuvieran valores muy erráticos (poca continuidad espacial), existirían pocas redundancias entre datos agrupados y, por lo tanto, no sería necesario ponderarlos. Ahora, incluir el criterio de continuidad espacial requeriría utilizar métodos geoestadísticos (kriging) que, a esta altura del estudio, no se justifican. (Emery, 2013)

### 2.3.8. Diagrama de caja

A veces, se acompaña el histograma con un diagrama de caja (“box plot”) que presenta un solo eje en el cual se representan cinco cuantiles: los cuantiles a 2.5% y 97.5%, el primer y el tercer cuartil y la mediana (Figura 3.5). Entre los dos cuantiles extremos, se observa el 95% de los datos, mientras que entre el primer cuartil y la mediana se observa el 25% de los datos, al igual que entre la mediana y el tercer cuartil. El diagrama de caja permite resumir algunas características de la distribución, tal como su simetría y su dispersión. (Emery, 2013)

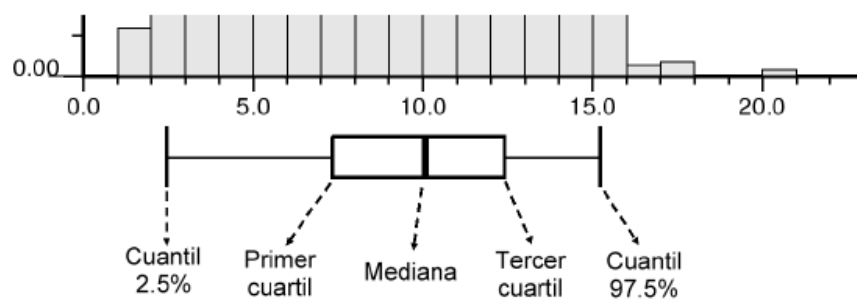


Figura 2.5 Diagrama de caja para un grupo de datos con concentraciones de elementos. (Emery, 2013)



### 2.3.9. Histograma acumulado

En lugar de visualizar la frecuencia de valores para cada intervalo, se puede visualizar la frecuencia acumulativa. De la misma forma que para el histograma estándar, las frecuencias se pueden calcular tomando en cuenta ponderadores de des agrupamiento (Figura 3.6). El histograma acumulado es una función creciente, desde 0 (para el valor más bajo de la variable) hasta 1 (para el valor más alto). (Emery, 2013)

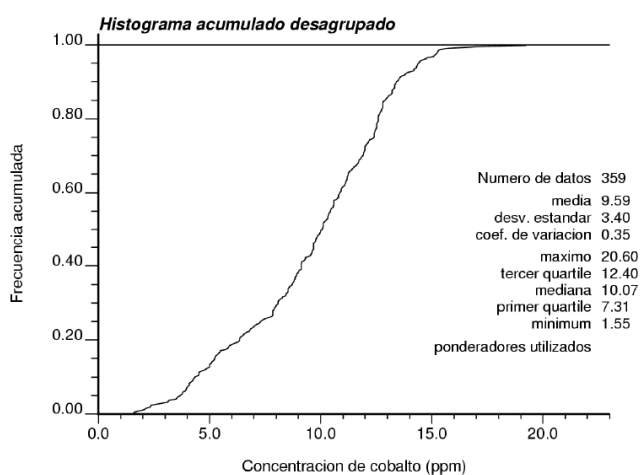


Figura 2.6 Histograma acumulado desagrupado de las concentraciones de cobalto (en ppm). (Emery, 2013)

### 2.3.10. Gráfico de probabilidad

Este gráfico sirve para comparar una distribución experimental con una distribución de referencia (en general, una normal o una lognormal). Consiste en cambiar la escala de los ejes del histograma acumulado de tal modo que, si la distribución experimental coincide con la distribución de referencia, se dibujaría una recta. En el caso de los datos de cobalto, la distribución difiere de una normal (Figura 3.7). (Emery, 2013)

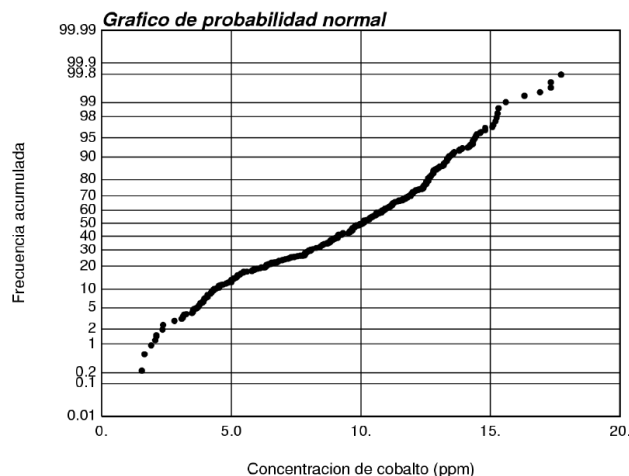


Figura 2.7 Gráfico de probabilidad normal para las concentraciones de cobalto. Note que la escala del eje de ordenada (frecuencia acumulada) ya no es aritmética. (Emery, 2013)

### 2.3.11. Conceptos generales sobre el modelamiento geoestadístico de datos

Para poder describir y “entender” un fenómeno regionalizado, es necesario elaborar una representación matemática o modelo. Una primera solución consiste en utilizar un modelo determinístico. En general, este enfoque conduce a una evaluación precisa de la variable regionalizada a partir de un número limitado de observaciones, pero requiere conocer la génesis del fenómeno y las leyes físicas o ecuaciones matemáticas que rigen la distribución de la variable regionalizada. No obstante, en general, los fenómenos regionalizados en estudio son extremadamente complejos y su comprensión puede ser tan parcial que un modelamiento determinístico es imposible o ilusorio. Ejemplos típicos son la evaluación minera, la exploración petrolífera o la caracterización de un macizo rocoso. Estamos entonces obligados a renunciar a una descripción determinística del fenómeno y recurrirla a un modelo probabilístico. Este proceder resulta operatorio, pues permite formalizar tanto los conocimientos como las incertidumbres que se tiene del fenómeno regionalizado. (Emery, 2013)

### **2.3.12. Límites de la estadística clásica**

En estadística clásica, se considera los datos como realizaciones independientes de una misma variable aleatoria, es decir, se supone que no tienen relaciones entre sí y que siguen la misma distribución de probabilidad. Se busca estimar los parámetros de esta distribución, cuya forma a menudo está predeterminada (normal, lognormal, etc.). Sin embargo, cuando los datos están ubicados en el espacio geográfico, las hipótesis de la estadística clásica son raramente aceptables. Intuitivamente, observaciones próximas tienen valores cercanos, mientras que aquellas que están más alejadas entre sí tienen una menor relación entre ellas. Así pues, en general, no puede considerarse modelar las variables regionalizadas por medio de funciones determinísticas, debido a su extrema complejidad. Tampoco se puede asimilar los datos medidos a variables aleatorias independientes. La geoestadística entrega una representación intermedia, a la vez aleatoria y funcional, al basarse en el concepto de función aleatoria. (Emery, 2013)

### **2.4. LA PRACTICA DEL MODELADO**

Isaaks en 1989 menciona que “el arte de modelar consiste en acoplar diferentes fuentes de información para construir un modelo permisible que capture las principales características espaciales del atributo en estudio.”

Con demasiada frecuencia, el proceso de modelado se considera como un mero ejercicio de ajuste de una curva a valores experimentales. Luego, el semivariograma se modela utilizando procedimientos de ajuste estadístico, en este caso, procedimientos semiautomáticos limitados a la estimación de los parámetros (sill, rango) de los modelos elegidos. Los procedimientos semiautomáticos pueden facilitar la determinación de los parámetros del modelo cuando la forma del semivariograma experimental es clara. Sin embargo, tales procedimientos contribuyen poco al

modelado real, ya que el analista debe tomar las decisiones más importantes con respecto al número, tipo y anisotropía de las estructuras básicas. (Isaaks y Srivastava, 1989)

### **2.4.1. Noción de función aleatoria**

Los modelos geoestadísticos consideran el valor  $z(x)$  de la variable regionalizada en un sitio  $x$  del campo  $D$  como una realización de una variable aleatoria  $Z(x)$ <sup>1</sup>. Cuando  $x$  recorre  $D$ , se obtiene un conjunto de variables aleatorias  $Z = \{Z(x), x \in D\}$  que constituye una función aleatoria. Contrariamente al modelo de la estadística clásica, las variables aleatorias así definidas no son independientes; por el contrario, existen interacciones o correlaciones entre ellas, las cuales reflejan la continuidad espacial de la variable regionalizada. El recurrir al concepto de función aleatoria es una afirmación, ni verdadera ni falsa, pues dicha función aleatoria es un objeto teórico que no existe en la realidad y la determinación de una función aleatoria a partir de una variable regionalizada no es una operación unívoca: varios modelos pueden resultar aceptables, en cuanto sean compatibles con la información disponible sobre la variable regionalizada. (Emery,2013)

### **2.4.2. Caracterización de una función aleatoria**

#### **2.4.2.1. Distribución espacial**

Consideremos una función aleatoria  $Z = \{Z(x), x \in D\}$  y una serie de sitios  $\{x_1, \dots, x_n\}$  en un área denominada  $D$ . El grupo de variables aleatorias  $\{Z(x_1), \dots, Z(x_n)\}$  está caracterizado por una función de distribución multivariable que depende de “ $n$ ” argumentos. El conjunto de funciones de distribución, para todos los enteros “ $n$ ” y todas las elecciones posibles de  $\{x_1, \dots, x_n\}$  en  $D$ , constituye la distribución espacial de la función aleatoria y siendo finito el número de datos disponibles sobre la variable regionalizada, es ilusorio querer inferir la distribución espacial completa de la función aleatoria, que contiene un número infinito de distribuciones de probabilidad.

Por ende, la puesta en marcha de las herramientas probabilísticas requiere simplificaciones.  
(Emery, 2013)

### 2.4.2.2. Distribuciones univariable y bivariables

Estas distribuciones corresponden a los casos particulares donde  $n = 1$  y  $n = 2$ . En general, los datos disponibles permiten inferir estas distribuciones. Es la razón por la cual la determinación de un modelo de distribución espacial suele basarse en dichas distribuciones. (Emery, 2013)

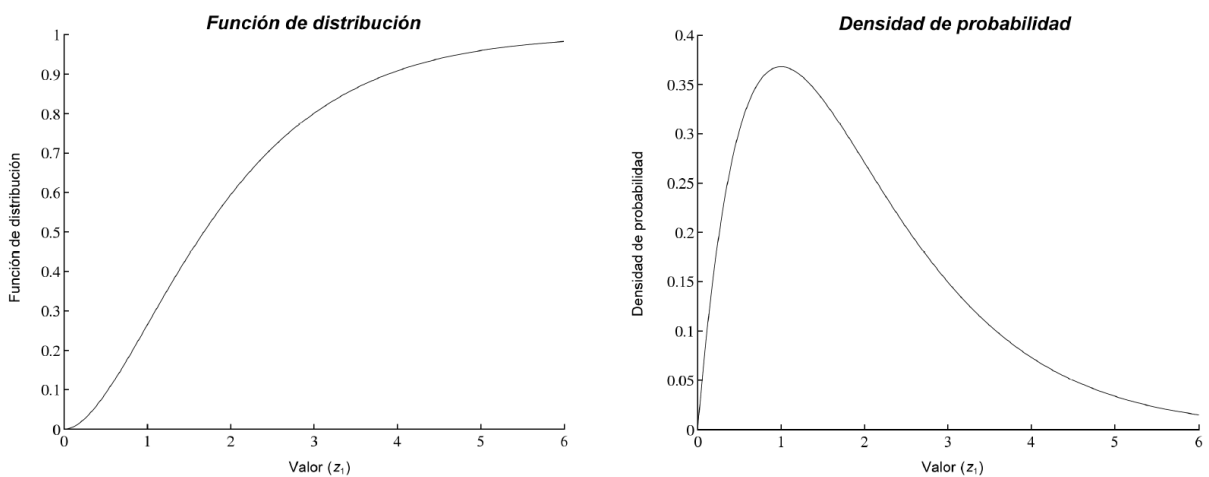


Figura 2II.8 Ejemplo de función de distribución y densidad de probabilidad univariable. La densidad de probabilidad se obtiene al derivar la función de distribución. (Emery, 2013)

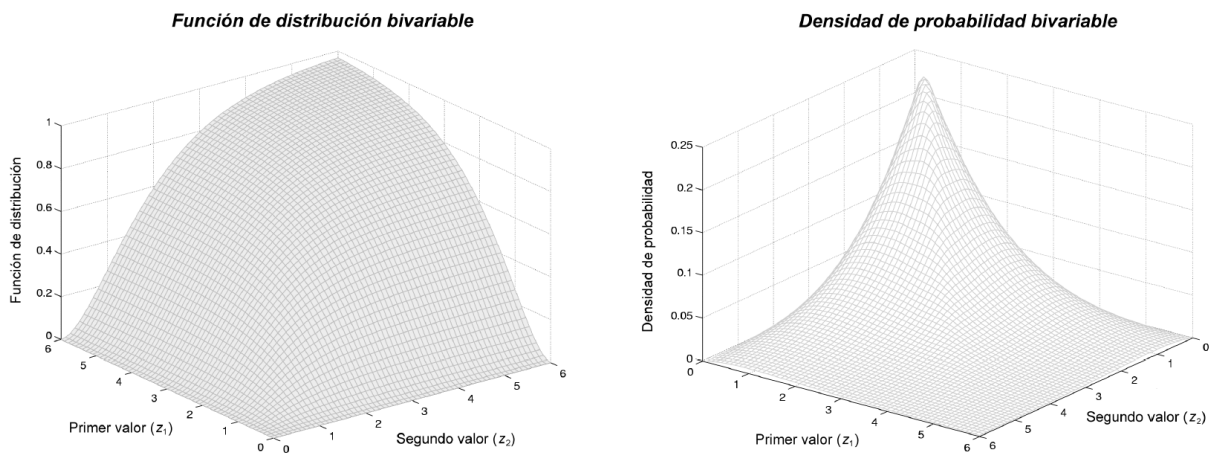


Figura 2.9 Ejemplo de función de distribución y densidad de probabilidad bivariable. La densidad de probabilidad se obtiene al tomar las derivadas parciales de la función de distribución con respecto a cada uno de sus argumentos. (Emery, 2013)

### 2.4.2.3. Momentos

En muchos problemas (como el de interpolación por kriging), se puede simplificar aún más la caracterización de la función aleatoria, al considerar solamente algunos parámetros descriptivos o momentos de las distribuciones univariadas y bivariadas, que “resumen” la información más relevante. Es decir, “El valor esperado” (esperanza, o momento de primer orden); la varianza que es una cantidad positiva. Su raíz cuadrada se llama desviación estándar. La varianza y la desviación estándar constituyen medidas de la dispersión de  $Z(x)$  en torno a su valor medio y cuantifican, de esta forma, su carácter “aleatorio”, también “la covarianza” que da una visión elemental del vínculo o “interacción” que existe entre  $Z(x_1)$  y  $Z(x_2)$ . (Emery, 2013)

También existe el “correlograma” que es adimensional y toma sus valores en el intervalo  $[-1,1]$ . Un coeficiente  $\rho$  nulo indica que las variables  $Z(x_1)$  y  $Z(x_2)$  no están correlacionadas (condición necesaria para que sean independientes), mientras que un coeficiente igual a 1 son directamente proporcionales ó  $-1$  indica que son inversamente proporcionales. (Emery, 2013)

### 2.4.2.4. Inferencia estadística – Hipótesis de estacionaridad

Para poner en marcha el formalismo probabilístico, es necesario poder determinar, por lo menos parcialmente, la distribución espacial de la función aleatoria a partir de los datos disponibles sobre la variable regionalizada (etapa de inferencia estadística). Dos razones impiden poder realizar la inferencia estadística en su forma más general: por una parte, la variable regionalizada sólo es una realización de la función aleatoria; por otra parte, esta realización se conoce de manera fragmentaria, en algunos sitios de muestreo. Para salir de este problema recurren a la noción de estacionaridad, es decir, que se supone que los valores que se encuentran en las diferentes regiones del campo presentan las mismas características y, por ende, pueden considerarse como distintas

realizaciones del mismo proceso aleatorio. Desde el punto de vista matemático, la hipótesis de estacionaridad consiste en postular que la distribución espacial de la función aleatoria es invariante por traslación, es decir, que las propiedades de un conjunto de datos no dependen de su posición absoluta en el espacio, sino de sus posiciones relativas. Lo mismo ocurre para los momentos de esta distribución, covarianza, correlograma y variograma. (Emery,2013)

Estos parámetros son más importantes que la esperanza y la varianza, pues muestran la “interacción” existente entre dos valores, luego dan una descripción sintética de la continuidad espacial de la variable regionalizada. La covarianza y el correlograma indican qué tan semejantes son los valores entre dos sitios, mientras que el variograma indica qué tan desemejantes son. (Emery, 2013)

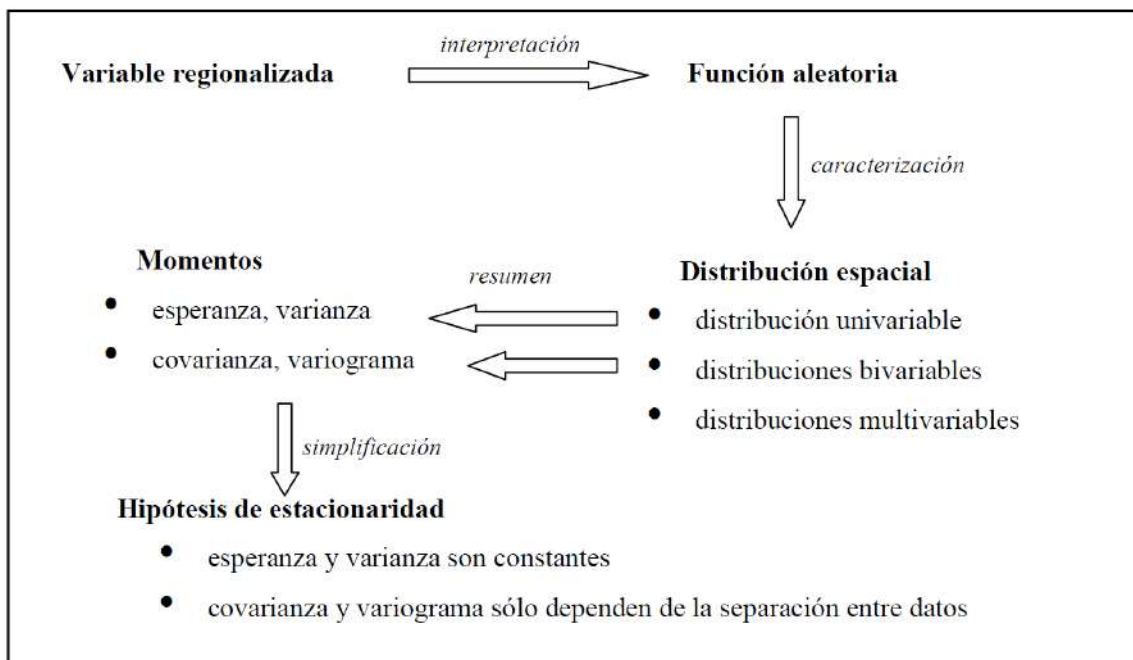


Figura 2.10 Esquema sintético de los conceptos e hipótesis que sustentan el modelo geostatístico. (Emery, 2013)

### 2.4.3. Modelos isotrópicos y anisotrópicos

El enfoque convencional para detectar anisotropía es comparar semivariogramas experimentales calculados en varias direcciones. Para decidir si la anisotropía geométrica está presente, se deben considerar al menos tres direcciones. Las direcciones de continuidad espacial mayor y menor a menudo se sugieren mediante la agrupación de valores grandes o pequeños en un mapa de ubicación, o mediante información auxiliar, como la orientación de las formaciones litológicas. (Isaaks y Srivastava, 1989)

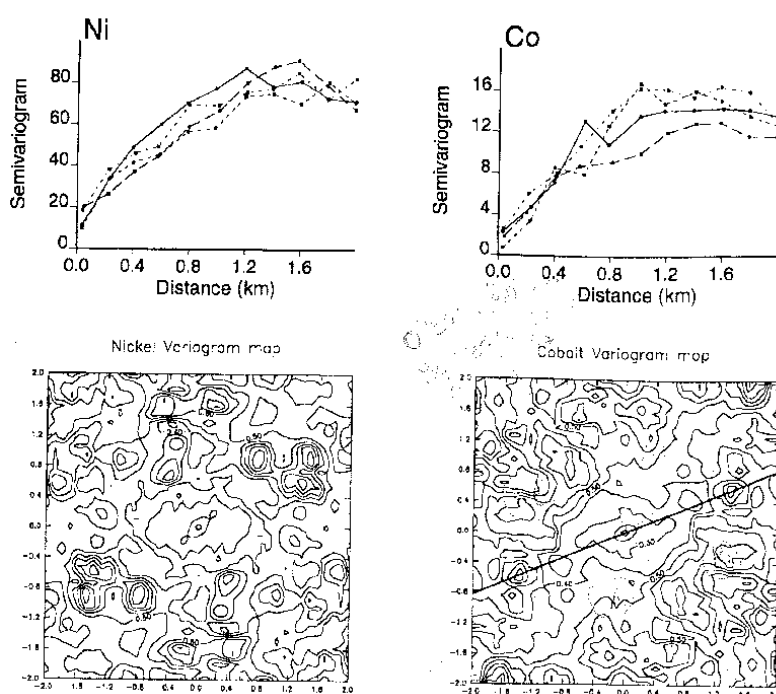


Figura 2.11 Semivariogramas direccionales y mapas de semivariogramas para detectar e identificar direcciones de anisotropía. Ambos metales (Ni, Co) presentan una estructura isotrópica de corto alcance, mientras que hay una mejor continuidad espacial de largo alcance (valores de semivariograma mas pequeños) para las concentraciones de Co en la dirección SW-NE. Esta mejor continuidad en la dirección SW-NE (línea negra) es evidente en el mapa de semivariogramas. (Isaaks y Srivastava, 1989)

Los mapas de semivariograma (Isaaks y Srivastava, 1989, p. 149-151; Chu, 1993) pueden facilitar enormemente la detección de direcciones de anisotropía. Un mapa de semivariograma es un gráfico de los valores del semivariograma experimental en el sistema de coordenadas ( $h_x$ ,  $h_y$ ); como muestra la figura 3.11. El centro del mapa corresponde al origen del semivariograma:  $\gamma(0)$



= 0. Cualquier sección transversal aparece como un semivariograma unidimensional tradicional. Los valores del semivariograma son pequeños cerca del origen (0, 0) y aumentan con la distancia desde este. Cuando la variación es isotrópica, el aumento es bastante similar en todas las direcciones; por lo tanto, el mapa muestra curvas de nivel concéntricas (Figura 3.11, gráfico inferior izquierdo). Por el contrario, la anisotropía geométrica aparece como líneas de contorno elípticas cuyo eje mayor indica la dirección de máxima continuidad (Figura 3.11, gráfico inferior derecho). (Isaaks y Srivastava, 1989)

Las concentraciones de la variable generalmente muestran una combinación de isotropía de corto alcance (círculos pequeños) y anisotropía de largo alcance (elipses grandes). El cálculo de un mapa de semivariograma requiere considerar muchas direcciones y lags. Por lo tanto, esta representación es la más adecuada para grandes conjuntos de datos en cuadrícula. Cuando los datos son escasos y están espaciados irregularmente, se necesitan grandes tolerancias angulares y de lag para completar el mapa de semivariograma, por lo que la resolución espacial del mapa puede reducirse drásticamente. Se debe tener en cuenta que el mapa de semivariograma proporciona información solo sobre las direcciones de continuidad espacial mayor y menor. Los modelos anisotrópicos aún deben adaptarse a semivariogramas direccionales. (Nielsen, 2009)

Es mejor ignorar una anisotropía que no es claramente aparente en semivariogramas experimentales o no está respaldada por ninguna información cualitativa. Por el contrario, una sólida información cualitativa previa puede llevar a uno a adoptar un modelo anisotrópico incluso si la escasez de datos impide ver la anisotropía de los semivariogramas experimentales. (Nielsen, 2009)

Elegir el número y las características (tipo, rango, anisotropía) de las estructuras básicas y determinar su contribución (sill, slope) a cada modelo es mucho más difícil que en el caso univariante. (Nielsen, 2009)

Las dificultades radican en el número de funciones de covarianza experimentales (semivariogramas) y las restricciones que deben satisfacer los coeficientes. El análisis se centra en los semivariogramas, los cuales se usan con más frecuencia práctica. Se podría adoptar un enfoque similar para las funciones de covarianza. (Nielsen, 2009)

#### **2.4.4. Selección de variables**

Cualquier modelo multivariado comienza con una selección de las variables  $N$ , para incluir en el análisis de correogionalización. En la mayoría de las situaciones, no tiene sentido conservar todos los atributos medidos ya que el número de variables que pueden manejarse conjuntamente mediante algoritmos de interpolación es limitado, también es probable que algunas variables sean redundantes y no es necesario considerarlas, mientras que las variables independientes se manejan mejor por separado, asimismo, aumentar el número de variables hace que el ajuste de todos los semivariogramas directos y cruzados sea mucho más tedioso. (Nielsen, 2009)

Es una buena práctica definir una jerarquía de variables según el objetivo que se persiga. De acuerdo con el objetivo del estudio se debe seleccionar una variable principal o primaria y retener preferentemente como variables secundarias una o dos más que mejor se correlacionen con esa variable primaria y que estén mejor muestreados. (Nielsen, 2009)

Se podrían construir diferentes modelos de correogionalización dependiendo de qué variable se seleccione como primaria. Un modelo único de correogionalización que se ajusta mal a los semivariogramas directos y cruzados de todos los atributos se reemplaza mejor por varios modelos

que proporcionan mejores ajustes a menos variables consideradas importantes para el objetivo. (Nielsen, 2009)

#### **2.4.5. Selección del modelo**

Una vez seleccionadas las variables, la siguiente decisión se refiere al tipo de modelo de correogionalización: intrínseco o lineal.

##### **2.4.5.1. Modelo de correogionalización intrínseco**

El modelo de correogionalización intrínseco es más fácil de ajustar que el modelo lineal en el sentido de que sólo una sola matriz de correogionalización necesita ser inferida. Sin embargo, tal modelo es mucho más restrictivo porque requiere que todos los semivariogramas experimentales directos y cruzados sean proporcionales entre sí. La condición de proporcionalidad se puede comprobar visualmente a partir de la forma de las curvas experimentales. De manera similar, todos los correogramas automáticos y cruzados son aproximadamente iguales. (Nielsen, 2009)

##### **2.4.5.2. Modelo lineal de correogionalización**

El modelo intrínseco, rara vez se ajusta a las correogionalizaciones experimentales. Una razón es que el filtrado de microestructuras no correlacionadas por el semivariograma cruzado generalmente conduce a un efecto pepita relativo más pequeño en el semivariograma cruzado que en los semivariogramas directos. Entonces se preferiría el modelo lineal más flexible de correogionalización. (Nielsen, 2009)

En este tipo de modelos, los semivariogramas directos o cruzados no necesitan incluir todas las estructuras básicas, también las variables que están bien correlacionadas de forma cruzada tienen más probabilidades de mostrar patrones similares de variabilidad espacial. (Nielsen, 2009)

## 2.5. ANALISIS VARIOGRAFICO

Según Emery (2013) “Los valores de una variable regionalizada no son independientes, en el sentido que un valor observado en un sitio proporciona información sobre los valores de los sitios vecinos. En la interpretación probabilística de la variable regionalizada, esta noción intuitiva de dependencia está descrita por la distribución espacial de la función aleatoria.”

Los momentos de orden 2 (covarianza, correlograma y variograma) están definidos con la ayuda de dos sitios, es decir del conjunto más pequeño que se puede considerar para describir la “interacción” entre valores. Son estos momentos los que entregan una descripción elemental y operatoria de la continuidad espacial de la variable regionalizada. En la mayoría de los casos suponemos que hay algún tipo de continuidad en el parámetro con el que estamos tratando. En varios casos existe un cierto límite en la continuidad del parámetro. Esto significa que si el vector que separa dos puntos excede un cierto límite la varianza del incremento no aumentará más. También el variograma suele ser discontinuo cerca del origen. Este fenómeno es el llamado efecto nugget o efecto pepita, puede explicarse en parte por el error de medición y en parte por un componente aleatorio en el parámetro que no es espacialmente dependiente. (Emery, 2013)

Para aplicar el modelo geoestadístico más común en la solución de un problema de interpolación, se debe seleccionar el variograma, ajustarlo a los datos, asumiendo que el modelo intrínseco es aplicable, y comprobar si este modelo intrínseco concuerda razonablemente con los datos. Para cualquier ubicación, utilizando un método llamado kriging podemos obtener la mejor estimación, así como el error cuadrático medio asociado con esta estimación. En otras palabras, podemos obtener la estimación más precisa y una medida de qué tan cerca está esta estimación del valor real. (Emery, 2013).

### 2.5.1. Variograma experimental

La función del variograma debe estimarse sobre la base de los datos disponibles. En el caso de un conjunto de datos finitos, la estimación del variograma se puede hacer solo para un conjunto finito de vectores. El estimador así definido lleva el nombre de variograma experimental y no se trata de una función propiamente como tal, sino, de una serie de valores, pues sólo se puede calcular para vectores que no se encuentren vacíos. (Emery, 2013)

#### 2.5.1.1. Tolerancias en los parámetros de cálculo

Si los datos están irregularmente distribuidos en el campo  $D$ , el número de pares  $|N(h)|$  que interviene en el cálculo del variograma para un vector  $h$  dado, es generalmente muy pequeño (incluso igual a 0 ó 1). El variograma experimental tiene entonces un aspecto muy errático y resulta imposible interpretarlo y modelarlo. Para que sea más robusto, se suele permitir algunas tolerancias de cálculo, sobre las distancias y las direcciones, donde  $T(h)$  es una región de tolerancia alrededor de  $h$ , tanto positivo y negativo, en el caso unidimensional. En el caso bidimensional o tridimensional, existen tolerancias tanto sobre la longitud de  $h$  como sobre su orientación, tal como se ilustra en la Figura 2.12 (Emery, 2013)

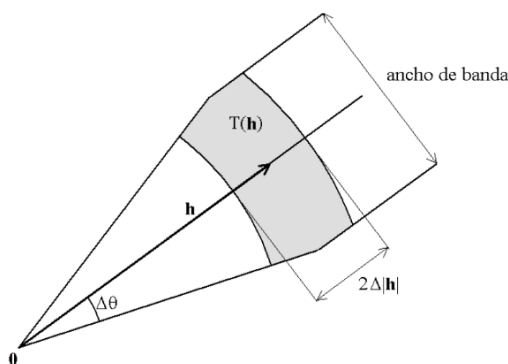


Figura 2.12 Tolerancia alrededor de  $h$  (Emery, 2013)

El ancho de banda limita la separación del cono de tolerancia a una extensión máxima. En el espacio de tres dimensiones, se introduce dos anchos de banda: uno horizontal y otro vertical. En resumen, los parámetros a especificar para calcular un variograma experimental son la dirección de interés (azimut e inclinación), las distancias de interés, en general múltiplos de una distancia elemental llamada paso (“lag”), la tolerancia en la dirección: tolerancia angular (ancho(s) de banda). (Emery, 2013).

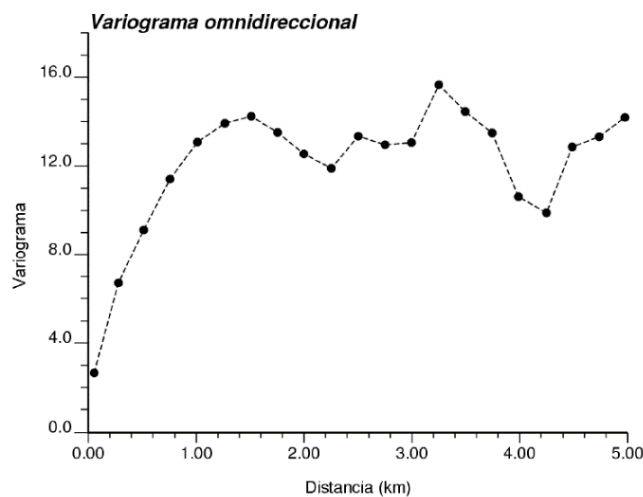


Figura 2.13 Variograma experimental omnidireccional de las concentraciones de cobalto. Las líneas punteadas solo unen a los distintos puntos del variograma experimental. muestra un variograma experimental de las concentraciones de cobalto procedentes de los datos de contaminación de suelo. Este variograma ha sido calculado para distancias múltiplos de la malla de muestreo (0.25 km), con una tolerancia en la distancia de 0.125 km y una tolerancia angular de 90°, es decir, sin importar la orientación del vector  $h$ . En este caso se habla de variograma “omnidireccional”. (Emery, 2013)

### 2.5.1.2. Propiedades del variograma experimental

El variograma experimental  $\gamma(h)$  es un estimador insesgado del variograma teórico. Mientras más elevada sea la varianza, más susceptible es el variograma experimental de fluctuar en torno a su valor esperado y más difícil se vuelve la inferencia estadística, los principales factores que la influyen son; la distancia considerada donde la varianza relativa de  $\gamma(h)$  suele tomar valores considerables para las grandes distancias (para fijar las ideas, aquellas distancias mayores que la

mitad del diámetro del campo). Otro factor que puede influenciar es la irregularidad o el carácter preferencial de la malla de muestreo, que pueden provocar grandes fluctuaciones en el variograma experimental, incluso para pequeñas distancias, también el número de pares de datos: mientras más bajo, mayores son las fluctuaciones y la presencia de datos extremos (outliers), los cuales tienen un impacto considerable en el cálculo del variograma experimental, pues este último eleva los valores al cuadrado. (Emery, 2013)

### 2.5.1.3. Estructuras básicas

Se debe evitar sobre ajustar semivariogramas experimentales. El objetivo es capturar las principales características espaciales del atributo, no modelar ningún detalle (posiblemente falso) de los semivariogramas de muestra. Cuando diferentes modelos anidados proporcionan ajustes similares, se debe seleccionar el más simple. Cuando es suficiente un modelo esférico, no es necesario sumar dos modelos exponenciales (Figura 3.14). El modelo más complicado generalmente no conduce a estimaciones más precisas.

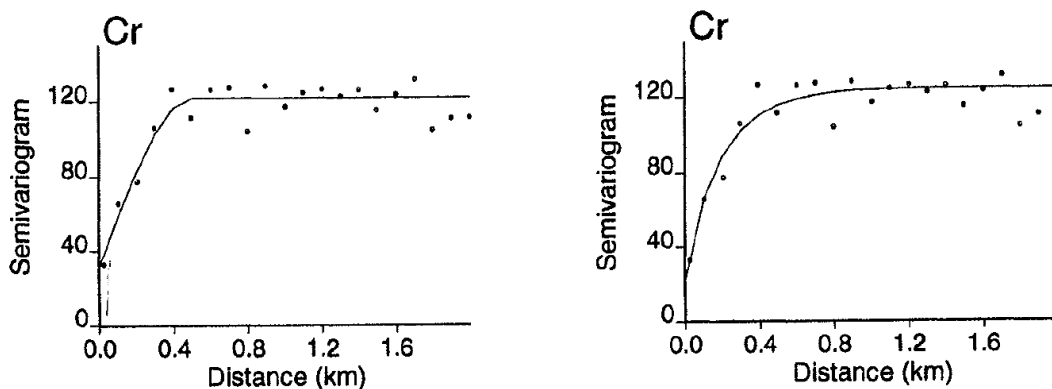


Figura 2.14 Dos modelos que se ajustan igualmente bien al semivariograma experimental para concentraciones de Cr. El primer modelo (izquierda) es más parsimonioso en el sentido de que solo están involucradas dos estructuras básicas: un efecto pepita y un modelo esférico. Para la interpolación, tal modelo sería preferible al segundo modelo (derecha), que incluye tres estructuras básicas: un efecto pepita y dos modelos exponenciales. (Emery, 2013)

#### 2.5.1.4. Mapa variográfico

El mapa variográfico consiste en visualizar el variograma experimental en todas las direcciones del espacio, bajo la forma de un mapa con escala de color o de grises. Ayuda a distinguir si existe anisotropía, para luego calcular el variograma experimental a lo largo de las direcciones principales de anisotropía. A modo de ilustración, el mapa variográfico de los datos de concentración de cobalto (Figura 3.15, izquierda) dibuja una dirección de mayor continuidad con una orientación de  $60^\circ$  aproximadamente desde el eje norte-sur (los colores claros indican valores pequeños para el variograma experimental, mientras que los colores oscuros indican valores más grandes). Esta observación se confirma al calcular los variogramas experimentales direccionales (Figura 3.15, derecha), donde se aprecia un crecimiento más lento en la dirección  $N60^\circ E$  y más rápido en la dirección ortogonal  $N30^\circ W$ . Para el modelamiento, se preferirá utilizar estos variogramas direccionales en lugar del variograma omnidireccional, puesto que este último no captura el cambio de continuidad espacial con la dirección (anisotropía). (Emery, 2013)

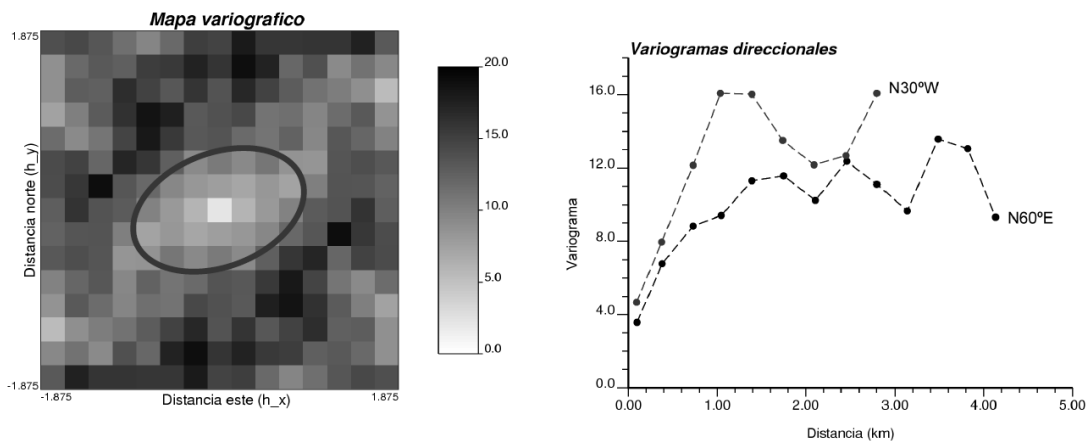


Figura 2.15 Mapa variográfico (izquierda) y variograma experimental calculado a lo largo de las direcciones de anisotropía reconocidas ( $N60^\circ E$  y  $N30^\circ W$ ) (derecha) (Emery, 2013)



### **2.5.1.5. Consideraciones prácticas**

- 1 Las direcciones de cálculo del variograma experimental deben considerar la anisotropía de la variable regionalizada, su elección se puede hacer al examinar el mapa variográfico. En el caso isótropo (es decir, si los variogramas direccionales se superponen salvo por pequeñas fluctuaciones estadísticas), se podrá considerar un variograma “omnidireccional”. (Emery, 2013)
- 2 En general, cada variograma direccional se calcula para distancias múltiplos de una distancia elemental, llamada “Lag”. La elección del paso puede tener repercusiones en el cálculo. Un paso demasiado pequeño conducirá a un variograma experimental errático, poco estable, mientras que un paso demasiado grande no permitirá apreciar los detalles de la continuidad espacial, en especial el comportamiento en el origen del variograma. (Emery, 2013)
- 3 Se debe tener cuidado con la representatividad del variograma experimental. Para cada punto del variograma, se podrá determinar el número de pares de datos utilizados para su cálculo; un número de pares bajo indica un punto poco confiable. (Emery, 2013)

### **2.5.2. Variograma modelado**

El variograma experimental no puede utilizarse directamente. Por una parte, sólo está definido para ciertas distancias y direcciones, por lo que es incompleto. Por otra parte, está sujeto a ciertas aproximaciones, debido al número limitado de datos y a los parámetros de tolerancia utilizado en el cálculo. Entonces, la idea es ajustar un modelo teórico de variograma en torno al variograma experimental. Esta etapa es la fase esencial de todo estudio geoestadístico, pues aquí es donde uno “interpreta” la continuidad espacial de la variable regionalizada. (Emery, 2013)

## 2.5.2.1. Propiedades de un variograma teórico

### 2.5.2.1.1 Comportamiento en el origen

Mientras más regular el variograma en el origen (distancias cercanas a 0), más regular es la variable regionalizada en el espacio. Se suele distinguir tres tipos de comportamiento para el variograma en el origen (Figura 3.16), el variograma parabólico que corresponde a una variable regionalizada muy regular en el espacio, el lineal que concierne a una variable regionalizada continua, pero no tan regular y el discontinuo que corresponde a una variable regionalizada más errática, es decir, con discontinuidades en la distribución espacial de sus valores. También se debe tener en cuenta que la diferencia entre dos datos muy cercanos no es despreciable; los valores medidos varían a una escala muy pequeña y su continuidad no es perceptible. Este fenómeno se llama efecto pepita, por referencia a las leyes de oro en los yacimientos auríferos, que cambian repentinamente cuando hay pepitas de oro. (Emery, 2013)

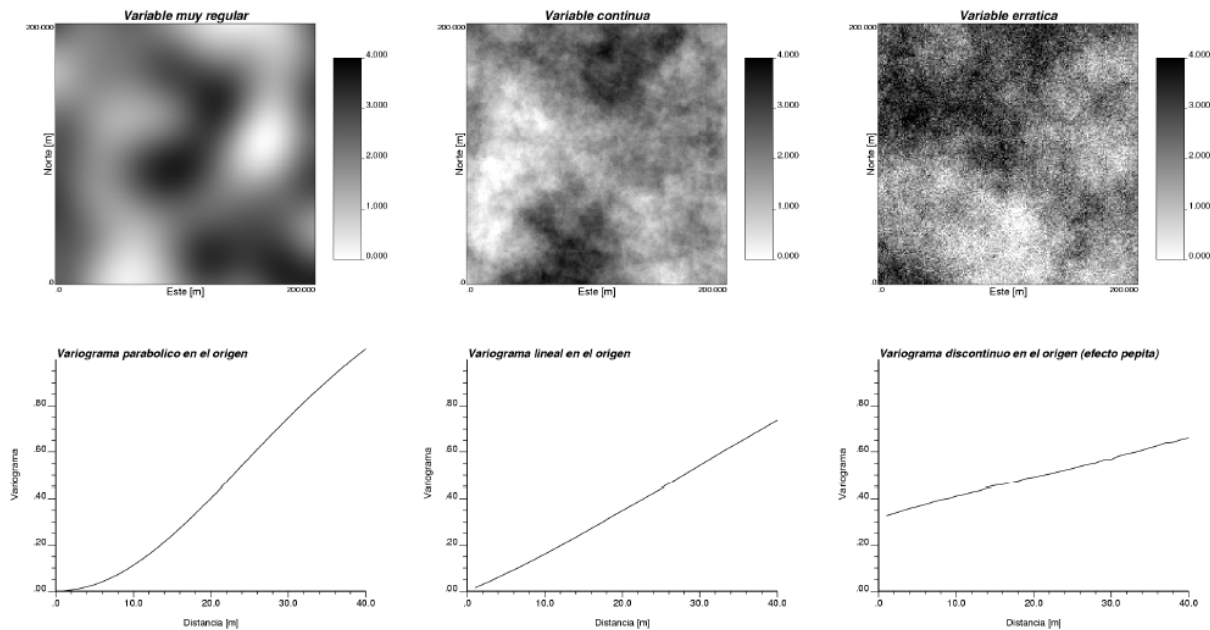


Figura 2.16 Relación entre la regularidad espacial de una variable regionalizada (arriba) y el comportamiento en el origen del variograma (abajo) (Emery, 2013)

### 2.5.2.1.2 Comportamiento para distancias muy grandes

Frecuentemente, el variograma crece a partir del origen y se estabiliza, a partir de una distancia “a”, en torno a una “meseta”. En este caso, se demuestra que esta meseta es igual a la varianza a priori, las dos variables aleatorias  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  estarán correlacionadas si la longitud del vector de separación  $h$  es inferior a la distancia “d”, que se denomina el alcance este alcance corresponde a la noción intuitiva de zona de influencia, más allá de esta, el variograma es constante e igual a su meseta y las variables  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  son independientes (en rigor, no están correlacionadas). (Emery, 2013).

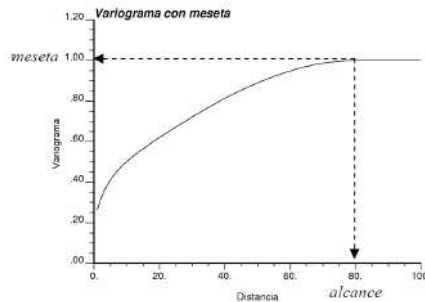


Figura 2.17 Variograma con meseta y alcance (Emery, 2013)

A veces, el variograma crece infinitamente cuando la distancia aumenta y no presenta meseta ni alcance. En este caso, la varianza a priori es infinita y no existe la función de covarianza ni el correlograma. (Emery, 2013)

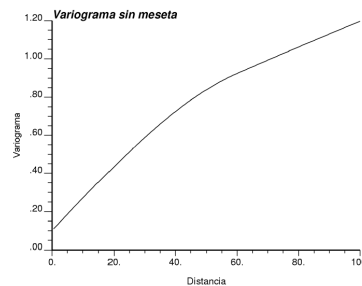


Figura 2.18 Variograma sin meseta (Emery, 2013)

La ausencia de meseta puede ser también un efecto de la escala de observación, cuando el variograma sí alcanza una meseta, pero para una distancia mayor a la máxima distancia de cálculo. (Emery, 2013)

### 2.5.2.1.3 Comportamiento direccional

Un variograma es isótropo si es idéntico en todas las direcciones del espacio, es decir, si no depende de la orientación del vector  $h$ , sino sólo de su módulo  $|h|$ . En caso contrario, hay anisotropía; tal propiedad caracteriza un fenómeno que se extiende de preferencia en ciertas direcciones. (Emery, 2013)

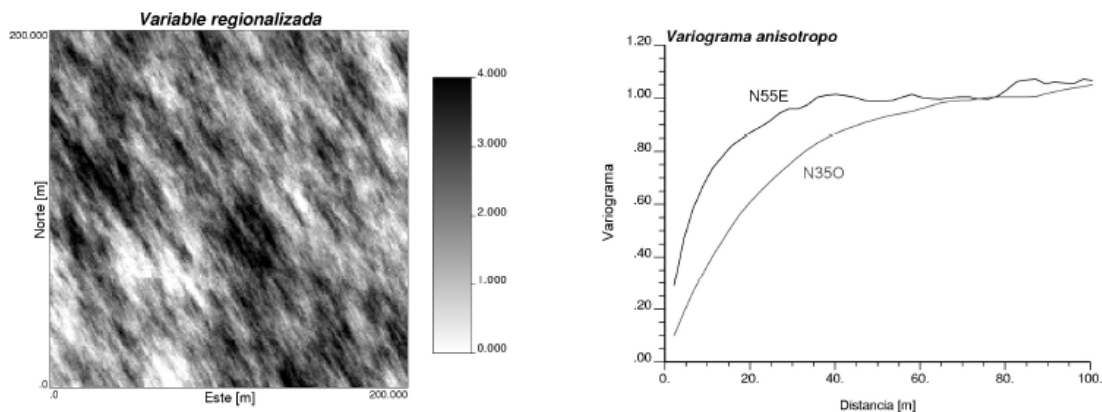


Figura 2.19 Variable regionalizada con dirección preferencial de continuidad (izquierda) y variograma en las direcciones de mayor y menor continuidad (derecha) (Emery, 2013)

### 2.5.3. Efecto pepita o nugget

Este modelo de variograma alcanza inmediatamente su meseta, hay ausencia total de correlación espacial, de modo que la geoestadística encuentra todos los resultados de la estadística clásica. Es un caso poco frecuente en las aplicaciones, a menos que los errores de medición sean muy grandes o que las distancias entre datos sean mayores que el alcance real, en cuyo caso la continuidad espacial es imperceptible. (Emery, 2013)

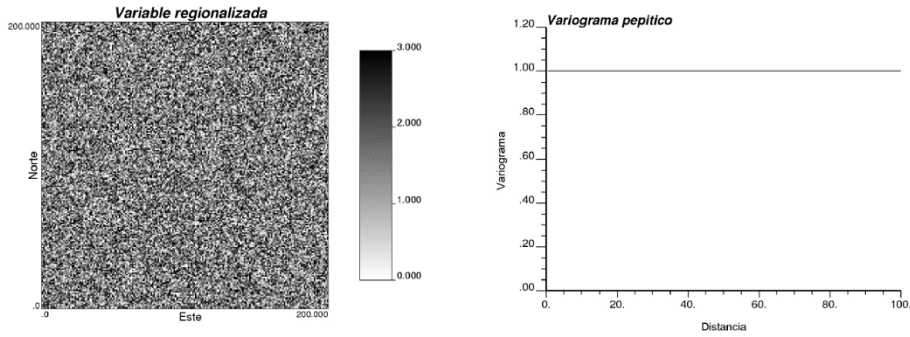


Figura 2.20 Variograma pepitico (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) (Emery, 2013)

El efecto pepita puede deberse a la presencia de una “micro-estructura”, o sea, un modelo anidado de alcance pequeño respecto a la escala de observación. Por ejemplo, consideremos un modelo anidado compuesto de dos estructuras: la primera de alcance a centimétrico y la segunda de alcance kilométrico. En la vecindad del origen, el variograma presentará una zona de crecimiento que alcanzará rápidamente (después de algunos centímetros) la meseta. A la escala kilométrica, este crecimiento se confundirá con una discontinuidad en el origen, es decir, con un efecto pepita. (Emery, 2013)

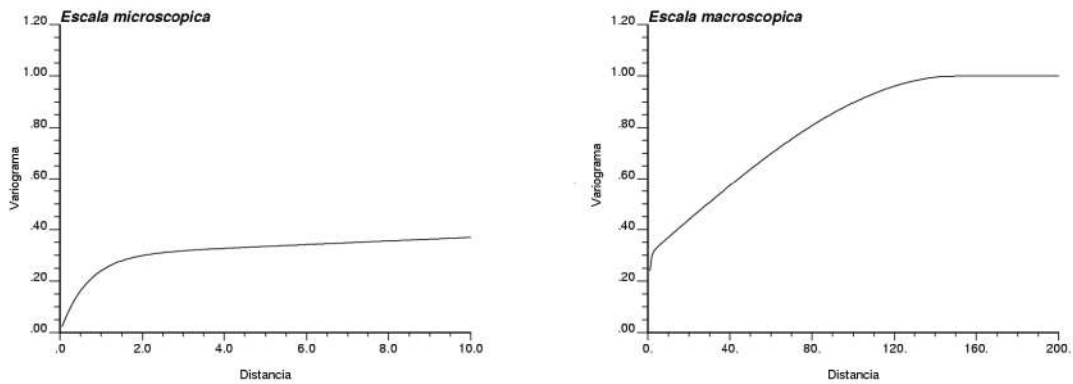


Figura 2.21 Génesis de un efecto pepita (Emery, 2013)

Así, un efecto pepita puede ser la manifestación de una escala de variabilidad cuyas dimensiones características son muy inferiores a la escala de trabajo: sólo la meseta de esta “micro-estructura” es mensurable (está dada por la amplitud del efecto pepita), sus otros rasgos son imperceptibles . (Emery, 2013)

El efecto pepita también se da debido al efecto de soporte, se sabe que la variabilidad de una variable regionalizada aumenta cuando disminuye el soporte en el cual se mide esta variable. Así, un soporte de mediciones pequeño puede significar una importante componente pepítica que oculta la continuidad subyacente de la función aleatoria. Un soporte más voluminoso conduciría a una disminución de la constante pepítica y una mejor apreciación de la continuidad de los valores. La teoría establece que la amplitud (meseta) del efecto pepita es inversamente proporcional al volumen de la medición, y asimismo por errores de medición, en el caso de que las mediciones estén afectadas por errores, el variograma suele presentar un efecto pepita. O por errores de ubicación de los datos. Del mismo modo que los errores de medición, el tener errores en la posición de los datos introduce un efecto pepita en el variograma. (Emery, 2013)

El efecto pepita generalmente se determina extrapolando el comportamiento de los primeros valores del semivariograma al eje vertical y se debe tener en cuenta que el efecto pepita relativo en los semivariogramas experimentales tiende a aumentar con la tolerancia de lag (Figura 3.21) y con la escasez de datos. Por lo general, el efecto pepita relativo disminuye a medida que se dispone de más y mejores datos. (Emery, 2013)

Cuando los datos están agrupados y hay un efecto proporcional, el efecto pepita relativo se infiere mejor a partir de semivariogramas relativos. Al igual que otras estadísticas de resumen, los valores de  $\gamma(h)$  también son sensibles a la agrupación de valores de datos, particularmente cuando dicha agrupación se combina con un efecto proporcional. Para distribuciones con sesgo positivo,

la varianza local aumenta con la media local (efecto proporcional directo). Por el contrario, si la distribución está sesgada negativamente, las variaciones más grandes generalmente corresponden a medias más pequeñas (efecto proporcional inverso). Se puede detectar un efecto proporcional a partir de un diagrama de dispersión (scatter plot). (Emery, 2013)

Un modelo de semivariograma gaussiano siempre debe combinarse con un pequeño efecto pepita para evitar inestabilidades numéricas en algoritmos de interpolación (Posa, 1989) y generación de artefactos en mapas interpolados (Wackernagel, 1995, p. 110-112).

La escasez de datos, los errores de medición, o ambos, pueden producir semivariogramas ruidosos que aparecen como un efecto pepita puro. La elección de un modelo de efecto de pepita puro es una decisión de modelado extrema que excluye el uso de kriging. La mayoría de los fenómenos naturales están estructurados espacialmente. Los semivariogramas con mucho ruido suelen reflejar una falta de resolución espacial (el rango de correlación es más pequeño que el intervalo de muestreo más corto) o la inadecuación de los dispositivos de medición. El objetivo no es modelar la continuidad espacial de los datos, sino la del atributo. Debe adoptarse un modelo de continuidad espacial siempre que información cualitativa confiable indique que el fenómeno está efectivamente estructurado espacialmente. (András, 2000)

#### **2.5.4. Sill o meseta**

La contribución de las estructuras, que no son efecto pepita, a los semivariogramas experimentales es generalmente mucho más fácil de inferir. Entonces la meseta se traduce como el punto más alto del variograma hasta el cual las variables están correlacionadas. A partir de este punto el comportamiento del variograma es de poca importancia. (András, 2000)

### **2.5.5. Rangos**

El rango de un modelo es fácil de inferir a partir de semivariogramas experimentales con buen comportamiento. Cuando la escasez de datos o los valores atípicos hacen que el semivariograma tradicional sea errático, las características a gran escala (rango y anisotropía) pueden inferirse mejor a partir de medidas como el de semivariogramas relativos. El rango del semivariograma experimental generalmente tiende a aumentar a medida que se dispone de más y mejores datos. (Emery, 2013)

### **2.5.6. Parámetros de anisotropía**

Las anisotropías se manifiestan cuando el variograma difiere según las direcciones del espacio. En ausencia de anisotropía, el variograma sólo depende del módulo del vector de separación  $h$ , no de su orientación. Como los modelos elementales de variograma están definidos para el caso isótropo, debemos examinar las transformaciones que permiten el paso a modelos anisótropos. En la práctica, las anisotropías se pueden identificar al comparar los variogramas experimentales calculados a lo largo de varias direcciones del espacio, por ejemplo, en el caso bidimensional, a lo largo de las direcciones orientadas por ejemplo a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  con respecto al eje de las abscisas. Cuando hay isotropía, los variogramas experimentales en las diferentes direcciones se superponen y el mapa variográfico dibuja círculos (2D) o esferas (3D). En el caso contrario, se está en presencia de una anisotropía. (Emery, 2013).

#### **2.5.6.1. Anisotropía geométrica**

Una anisotropía se dice geométrica cuando el mapa variográfico dibuja elipses concéntricas (caso 2D) o elipsoides (3D). Los variogramas direccionales tienen la misma forma, pero alcances diferentes. En el caso bidimensional, la anisotropía geométrica queda completamente definida por



su coeficiente de anisotropía  $a/b$ , razón entre el eje menor “a” y el eje mayor “b” de cualquiera de las elipses de isovalores, y el ángulo de anisotropía  $\theta$ , formado por el eje mayor y el eje de las abscisas. El primero indica la “intensidad” de la anisotropía, mientras que el segundo indica su orientación. En el caso tridimensional, se debe definir dos coeficientes de anisotropía y dos ángulos. (Emery, 2013).

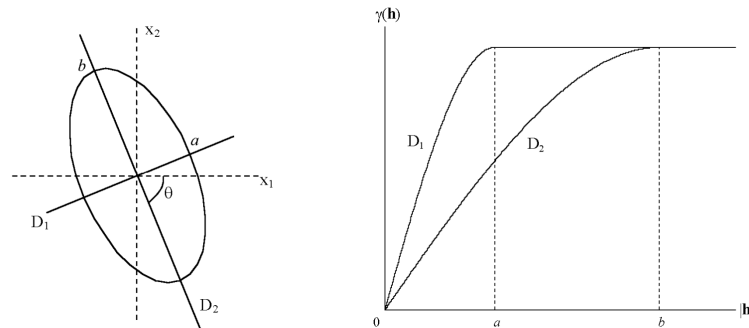


Figura 2.22 Ejemplo (2D) de anisotropía geométrica de razón  $a/b$  y ángulo  $\theta$ . Izquierda: elipse de alcances. Derecha: variograma en las direcciones principales de anisotropía. (Emery, 2013)

El modelado de una anisotropía geométrica se resume en dos pasos, el primero, los rangos (o pendientes) menores y mayores se infieren primero a partir de una serie de semivariogramas direccionales experimentales (Figura 3.23, gráficos superiores) y después los valores del modelo se calculan en otras direcciones y se comparan con los semivariogramas experimentales calculados en las mismas direcciones (Figura 3.23, gráficos inferiores). (Kitanidis, 1996)

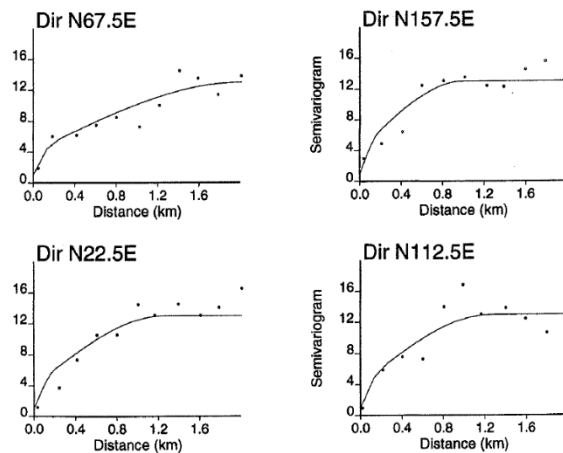


Figura 2.23 Semivariograma direccional experimental  $C_o$  y el modelo anisotrópico ajustado. Las menor y mayor direcciones de anisotropía son N 67.5 E y N 157.5 E. (Kitanidis, 1996)

### 2.5.6.2. Anisotropía zonal

Existen variogramas cuya anisotropía no puede corregirse con una transformación lineal de coordenadas, especialmente aquellos que presentan una meseta variable según la dirección del espacio. En un sentido estricto, la anisotropía zonal es un modelo en el cual la función aleatoria no depende de una (o varias) coordenada(s). Esto sucede a veces cuando se trabaja en el espacio de tres dimensiones. Por ejemplo, en el estudio de una veta, la variabilidad suele ser más importante en dirección perpendicular a la veta, que en esta misma. Como una primera aproximación, la función aleatoria es constante en el plano horizontal, de manera que su variograma  $\gamma(h)$  sólo depende de la componente vertical de  $h$ . Este variograma tiene la misma meseta en todas las direcciones del espacio excepto en el plano horizontal (Emery, 2013)

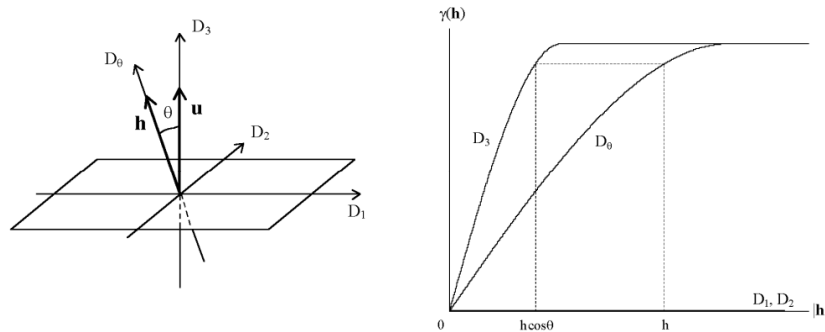


Figura 2.24 Ejemplo (3D) de anisotropía zonal en dirección vertical. Derecha: variogramas en las direcciones horizontales ( $D_1$ ,  $D_2$ ), vertical ( $D_3$ ) y una dirección oblicua ( $D\theta$ ) (Emery, 2013).

Una forma equivalente de definir la anisotropía zonal consiste en verla como una anisotropía geométrica donde el eje mayor de la elipse (elipsoide) de alcances se vuelve infinitamente grande. En el mapa variográfico, la elipse se convierte entonces en una banda. (Emery, 2013)

Según Xavier Emery (2013), “se debe tener en cuenta que la representación de una variable regionalizada por un variograma es una operación subjetiva: no existe un modelo subyacente “verdadero”. En la práctica, conviene asegurarse que el modelo elegido respete las principales

características del variograma experimental (efecto pepita, comportamiento en el origen, existencia o no de una meseta, anisotropía) y que no sea inútilmente complejo y en general, se agregan varios modelos de base, que idealmente modelan componentes espaciales de escalas diferentes. Inicialmente, se selecciona la familia de modelos básicos que se quiere utilizar, luego se ajusta sus parámetros (meseta, alcance...) procurando evitar el uso exclusivo de métodos de ajuste automáticos. Por el contrario, el modelamiento de un variograma debe ser un trabajo interactivo, donde el modelador tiene la última palabra”

También cabe mencionar que la elección de un modelo con o sin meseta se decide en función del comportamiento del variograma experimental para distancias grandes. Sin embargo, este comportamiento puede ser errático, por intervenir pocos pares de datos cuando la distancia se acerca a la dimensión máxima del campo. En general, se considera que el variograma experimental en una dirección es poco confiable para distancias superiores a la mitad del diámetro del campo en esta dirección. El ajuste de la meseta se hace en torno a las fluctuaciones del variograma y/o de la varianza empírica de los datos. El comportamiento del variograma en el origen puede no ser accesible si la malla de muestreo es demasiado grande. Así, una microestructura puede estar oculta y aparecer como un efecto pepita si la distancia más pequeña para la cual se calcula el variograma es mayor que su alcance. Frecuentemente, se adopta un modelo lineal en el origen (esférico o exponencial) con una constante pepítica que se obtiene extrapolando el variograma experimental hasta el eje de las ordenadas. (Emery, 2013)

Finalmente, la mayoría de las aplicaciones (problemas de estimación) no requieren el conocimiento del variograma para todas las distancias. Conviene ajustar el variograma hasta la escala de trabajo considerada. Más allá, el ajuste no tiene importancia. En conclusión, el análisis variográfico hace uso tanto de la información disponible sobre la variable en estudio, como del

cuidado en la elección y el uso de herramientas, así como también de un sentido de la proximidad. Se trata de la etapa esencial de todo estudio geoestadístico y seguramente de aquella que menos se presta al automatismo. (Emery, 2013)

## 2.6. LA ESTIMACION LOCAL

La estimación local busca estimar o predecir el valor de la variable regionalizada en un sector del campo estudiado, a partir de los datos disponibles (problema de “interpolación” espacial). Es decir, estimar el valor “desconocido” de la variable regionalizada estudiada en un sitio, a partir de los valores conocidos en sitios con datos. Para ello, se buscará asignar un ponderador a cada dato. (Emery, 2013)

### 2.6.1. Interpolación por el vecino más cercano

Este estimador atribuye toda la ponderación al dato más cercano al sitio a estimar. El estimador apantalla a todos los datos salvo el más cercano, luego omite gran parte de la información y probablemente carece de precisión. (Emery, 2013)

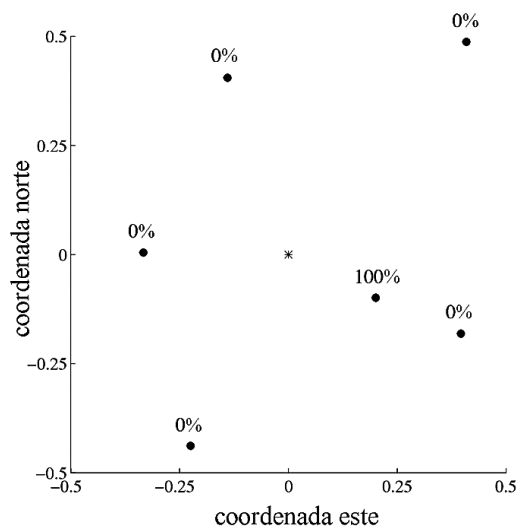


Figura 2.25 Ponderación obtenida con la interpolación por el más cercano vecino. (Emery, 2013)

## 2.6.2. Inverso de la distancia

Este segundo estimador asigna a cada dato una ponderación inversamente proporcional a su distancia al sitio a estimar.

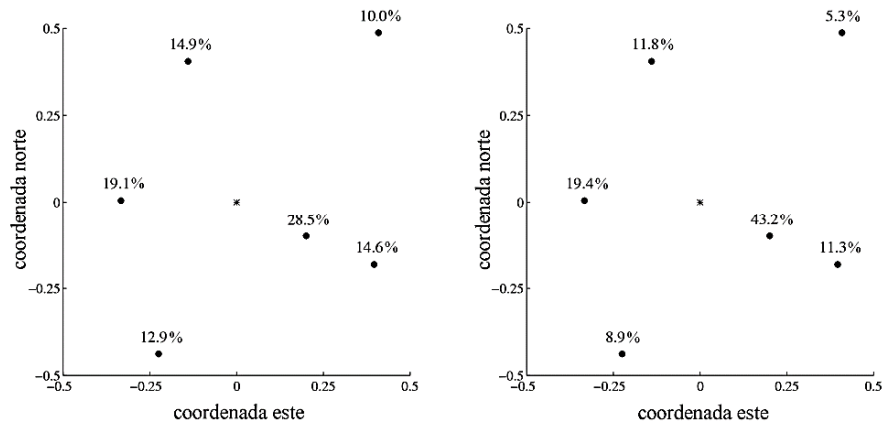


Figura 2.26 Ponderación obtenida con la interpolación por inverso de la distancia (izquierda) e inverso del cuadrado de la distancia (derecha). (Emery, 2013)

Si la potencia es baja (cercana a cero), la distancia elevada a esta potencia es cercana a 1, por lo que el estimador asigna la misma ponderación a todos los datos (media aritmética de los datos). Al contrario, si la potencia es muy alta, el inverso de la distancia más pequeño se vuelve preponderante sobre todos los otros términos, y el estimador se convierte en el del vecino más cercano. (Emery, 2013)

## 2.6.3. Kriging

En la práctica, ningún método es siempre mejor que otro, de modo que la elección de uno u otro método no es trivial. El kriging busca mejorar la interpolación de los datos tomando en cuenta sus distancias al sitio a estimar, las redundancias entre los datos debidas a posibles agrupamientos y la continuidad espacial de la variable regionalizada (variograma), lo que se traduce en privilegiar los datos cercanos si el variograma es muy regular en el origen, repartir la ponderación entre los datos si existe un importante efecto pepita y en caso de anisotropía, privilegiar los datos ubicados

en las direcciones de mayor continuidad con respecto al sitio a estimar. Asimismo, el kriging permitirá cuantificar la precisión de la estimación mediante una varianza que mide la dispersión del error potencial cometido en la estimación. (Emery, 2013)

#### **2.6.3.1. Plan de kriging**

En general, los problemas de estimación local no involucran la totalidad del campo y tampoco utilizan todos los datos disponibles. Se define la vecindad de kriging, como el dominio del espacio que contiene el sitio a estimar y los datos utilizados en la estimación. Se habla de vecindad única cuando se efectúa el kriging conservando todos los datos. En este caso, incluso los datos muy alejados intervendrán en la estimación. Sin embargo, salvo excepciones, su influencia será muy baja. Cuando los datos son muy numerosos, es inútil conservarlos todos para una estimación local, puesto que se corre el riesgo de aumentar considerablemente los tiempos de cálculo. (Emery, 2013)

El tamaño de la vecindad debe permitir un equilibrio entre varios factores ya que la precisión de las estimaciones: aumenta cuando la vecindad es más grande; influye también en los tiempos de cálculo, confiabilidad del modelo de variograma para grandes distancias, cambios en la continuidad espacial de la variable regionalizada, sin embargo uno de los factores más importantes a considerar en la elección del tamaño de la vecindad es la cantidad de datos disponibles en la vecindad más que el alcance del variograma. (Emery, 2013)

#### **2.6.3.2. Kriging de media conocida (kriging simple)**

Mientras menos ponderación le damos a los datos (en la práctica, esto ocurre cuando uno se aleja de estos datos), más ponderación recibe la media. El rol de la media es de compensar la falta

de información cuando los datos son escasos o alejados. Este kriging que supone conocida la media fue bautizado kriging simple. (Emery, 2013)

#### **2.6.3.3. Kriging de media desconocida (kriging ordinario)**

Este kriging se denomina “kriging ordinario”. Siendo el variograma una herramienta equivalente a la covarianza; se puede elegir utilizarlo en lugar de la función de covarianza. La varianza de kriging ordinario, es la meseta de su variograma. Pero, el kriging ordinario sigue aplicable incluso cuando el variograma no presenta meseta (por ejemplo, cuando es un modelo potencial). (Andre Journel, 1989)

#### **2.6.3.4. Co-kriging**

Se trata de la versión multivariable del kriging, donde se busca estimar el valor de una variable tomando en cuenta los datos de esta variable y de otras variables correlacionadas. La puesta en marcha del co-kriging requiere tener los modelos variográficos de cada variable, así como variogramas cruzados entre las distintas variables, para medir la correlación existente entre estas variables. Para poder determinar el variograma cruzado experimental, se necesita tener los datos de las diferentes variables en los mismos puntos de muestreo (Andre Journel, 1989)

#### **2.6.3.5. Observaciones sobre el sistema de kriging**

Los ponderadores y la varianza de kriging toman en cuenta las distancias entre el sitio a estimar y los sitios con datos, como también, la configuración geométrica de los sitios con datos y la posible redundancia de la información que contienen, la continuidad espacial de la variable, descrita por la función de covarianza o por el variograma. Además la precisión de una estimación es menor en las zonas cuyos valores tienen mayor variabilidad (a menudo, corresponden a las zonas de valores

altos, debido a lo que se denomina el efecto proporcional) que en aquellas de baja variabilidad. (Emery, 2013)

En general, el ponderador asignado a un sitio con datos es mayor cuando este sitio es más cercano al sitio a estimar. Pero varias situaciones pueden perturbar esta constatación “intuitiva” como por ejemplo la existencia de un fuerte efecto pepita en el modelo variográfico, que tiende a dar el mismo ponderador a todos los sitios con datos (como hay ausencia de continuidad espacial, un dato próximo aporta tanta información como uno lejano) o la presencia de una anisotropía, así un dato cercano en esta dirección más variable puede aportar “menos información” que un dato más alejado en otra que está en la dirección preferencial, y tener de esta forma un ponderador de kriging menor. También está la redundancia entre datos, cuando varios datos están agrupados y cercanos unos a otros, su ponderador acumulado es prácticamente el mismo que el ponderador que recibiría un solo dato en lugar del grupo. Dicho en otras palabras, el kriging corrige los efectos debidos a las irregularidades de la malla de muestreo y no sobrepondera los datos agrupados en perjuicio de los datos aislados (contrariamente a estimadores clásicos como el inverso de la distancia). (Journel, 1989)

#### **2.6.3.6. Propiedades del kriging**

##### **2.5.2.1.4 Interpolación exacta**

El kriging es un interpolador exacto, es decir, la estimación en un sitio con dato vuelve a dar el valor de este dato, mientras que la varianza de kriging en ese sitio es nula (Andre Journel, 1989)

##### **2.5.2.1.5 Propiedad de suavizamiento (alisamiento)**

El mapa de los valores estimados por kriging es más suave que el mapa de los valores reales, es decir, que presenta menos fluctuaciones. La búsqueda de una estimación precisa se acompaña



inevitablemente de este efecto de suavizamiento. La propiedad de suavizamiento tiene importantes consecuencias en la práctica cuando se busca determinar los valores de la variable regionalizada con relación a un umbral. Para obtener estimaciones insesgadas, se debe recurrir a métodos de kriging no lineal (kriging de indicadores, kriging disyuntivo, kriging multi-Gaussiano) o métodos de simulación cuyo objetivo es reproducir la variabilidad espacial de la variable regionalizada. (Andre Journel, 1989)

#### **2.6.4. Validación cruzada**

Se puede verificar la adecuación entre los datos y los parámetros adoptados (modelo de variograma, vecindad de kriging), utilizando la llamada técnica de la validación cruzada. El principio es estimar sucesivamente, mediante kriging, cada dato, considerando sólo los datos restantes. Se puede calcular entonces el error de estimación (diferencia entre el valor estimado y el valor verdadero) en cada sitio con dato y realizar un análisis estadístico de los errores cometidos en todos los sitios con datos. La validación cruzada es presentada usualmente bajo la forma de pruebas gráficas. (Emary, 2013)

### **2.7. SISMICA**

#### **2.7.1. Ondas Sísmicas En La Roca**

Una onda es una perturbación que transporta energía desde su fuente a través de la roca sin el transporte de materia. Es la energía de la onda, no las partículas del medio, la que viaja a través del medio. El movimiento de las ondas puede ser transitorio, periódico o aleatorio. El movimiento transitorio es la respuesta del medio a una excitación repentina similar a un pulso. El movimiento periódico es repetitivo, recurrente en la misma forma en incrementos de tiempo fijos, por ejemplo,

movimiento armónico. En movimiento aleatorio, la amplitud instantánea solo se puede predecir sobre una base probabilística (por ejemplo, ruido aleatorio). (Mendecki, A. J. 2013)

### 2.7.1.1. Onda P

La dilatación de la longitud de ondas primarias, donde la elasticidad media se expando o contrae y en la cual las partículas se mueven en la dirección de propagación con velocidad:

$$v_P = \sqrt{Y(1-\nu) / [\rho(1-2\nu)(1+\nu)]} = \sqrt{[2\mu(1-\nu)] / [\rho(1-2\nu)]}.$$

Nota la dependencia  $v_P$  en ambos, tanto del volumen como el módulo de corte. La razón es que durante la propagación de la dilatación media es subjetiva a la combinación de la compresión y el cizallamiento. El área de la sección transversal de los elementos normales de un cubo pequeño hacia la dirección de propagación no cambiará, pero la dimensión a través de la propagación se alterará. Por lo tanto, hay un cambio en la forma del elemento, así como en su volumen, y la resistencia del medio al cizallamiento, así como su compresibilidad entra juego. (Kolsky, 1963).

### 2.7.1.2. Onda S

Las ondas transversales o de corte o secundarias, donde el medio cambia de forma, pero no de volumen. Las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación con velocidad,  $v_S = \sqrt{\mu/\rho}$ . El movimiento de las partículas de onda S se puede descomponer arbitrariamente en componentes horizontales SH y verticales SV que, en medios isotrópicos homogéneos, viajan con la misma velocidad. La polarización, es decir, la dirección del movimiento de las partículas con respecto a la dirección de propagación de las ondas, tanto de las ondas P como

de las S, es lineal. En un medio anisotrópico, donde las propiedades varían con la dirección, la onda S se divide en una componente rápida y una lenta. Estas ondas divididas se propagan con diferentes velocidades que provocan un retraso de tiempo y un cambio de fase relacionado. En consecuencia, los dos componentes divididos de la onda S se superponen formando una polarización elíptica.

La orientación del eje principal y el grado de elipticidad están controlados por las direcciones de velocidad rápida y lenta del medio con respecto a la dirección de propagación de la onda y el grado de anisotropía. Una propagación independiente de las ondas P y S sólo está garantizada en frecuencias suficientemente altas, en las que se producen variaciones espaciales de las propiedades elásticas en distancias mucho mayores que la longitud de onda de las ondas implicadas. Los fluidos y gases no tienen resistencia al corte,  $\mu = 0$ , y por lo tanto, no propagan ondas de corte. (Mendecki, A. J. 2013)

## **2.7.2. Cuantificación de un evento sísmico**

### **2.7.2.1. Fuente Sísmica**

Un volumen de tensión inelástica repentina de roca (desviada y/o isotrópica) que irradia ondas sísmicas perceptibles. Para ser perceptible, la velocidad de deformación debe ser de al menos 1 mm/s. Un stress promedio en origen es  $10^{-4}$ . (Mendecki, A. J. 2013)

### **2.7.2.2. Potencia Sísmica**

La potencia sísmica P de una sola fuente de dislocación es el producto de un deslizamiento de promedio de un área de fuente,  $P = uA$ . Para una fuente compleja, la potencia es el producto del stress fuente,  $\Delta\varepsilon = \Delta\sigma/\mu$ , y el volumen fuente,  $P = \Delta\varepsilon V$ , donde  $\Delta\sigma$  es una caída de stress promediada y  $\mu$  es la rigidez de la masa rocosa que rodea la fuente. Momento sísmico  $M = \mu P = \mu \Delta\varepsilon V = \Delta\sigma V$ . La potencia sísmica es un parámetro observable en la asíntota de baja frecuencia del espectro de

desplazamiento donde las correcciones son menos difíciles y, como resultado, su estimación es menos incierta que la de la energía sísmica. (Mendecki, A. J. 2013)

### 2.7.2.3. Energía Sísmica

El momento sísmico  $M_0$  es una medida de la cantidad total de energía que se transforma durante el terremoto. Solo una pequeña fracción del momento sísmico  $M_0$  es convertida en Energía Sísmica Irradiada  $E_s$ , que es la que los sismógrafos registran.

Usando la relación estimada:

$$E_s = M_0 \cdot 10^{-4.8} = M_0 \cdot 1.6 \times 10^{-5}$$

Cuanto más lenta es la velocidad de ruptura y deslizamiento, menos es la energía irradiada. La ruptura cuasiestática no irradiaría prácticamente energía. La energía sísmica  $E$  para la fuente única de tipo fractura, expresada en términos de parámetros de la fuente es

$$E = -2\gamma_{eff} A + \int_A \Delta\sigma_{ij} u_i n_j dA + \int_0^{t_s} dt \int_{A(t)} \dot{\sigma} u_i n_j dA$$

Donde  $\gamma_{eff}$  es la energía superficial efectiva, que incluye la pérdida total de energía mecánica, en particular el trabajo inelástico y el flujo de calor desde el borde de la fractura,  $A$  es el área de fractura con el desplazamiento  $u_i$ ,  $\Delta\sigma_{ij}$  es la diferencia entre la tensión final (al final del evento) y la inicial,  $n_j$  es el vector unitario normal para el plano de fractura,  $t_s$  es la duración de la fuente y  $\dot{\sigma}_{ij}$  es la derivada temporal de la tensión o la tasa de tracción (Kostrov, 1974).

### 2.7.2.4. Índice De Energía

La noción de comparar las energías irradiadas de eventos sísmicos de similar potencia se puede traducir convenientemente en una herramienta práctica llamada índice de energía,  $E_I$  (Van

Aswegen y Butler, 1993). El índice de energía de un evento es la relación de la energía sísmica irradiada observada de ese evento  $E$ , a la energía promedio  $E^-(P) = 10d \log P + c$  irradiado por eventos de la potencia observada  $P$ , para un área de interés determinada,  $EI = E/E^-(P) = E/10d \log P + c = 10^{-cE/Pd}$ , que para  $d = 1,0$  sería proporcional stress aparente. Cuanto mayor sea el índice de energía, mayor será la conducción stress en el origen del evento en el momento de su ocurrencia. (Mendecki, A. J. 2013)

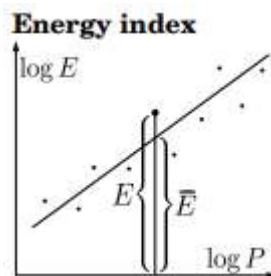


Figura 2.27 Grafico del índice de energía (Van Aswegen y Butler, 1993).

#### 2.7.2.5. Momento Sísmico

Más concretamente, el momento sísmico ( $M_0$ ) es una cantidad que combina el área de ruptura y la compensación de la falla con una medida de la resistencia de las rocas mediante la siguiente ecuación:

$$M_0 = \mu Au$$

Donde:  $\mu$  es el módulo de deformación de las rocas involucradas en el movimiento sísmico. Usualmente es de 30 gigapascales.  $A$  es el área de ruptura a lo largo de la falla geológica donde ocurrió el terremoto. Finalmente,  $u$  es el desplazamiento promedio de  $A$ . (Mendecki, A. J. 2013)

### 2.7.2.6. Magnitud De Momento Sísmico

La magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ) resume en un único número la cantidad de energía liberada por el terremoto (llamada «momento sísmico»,  $M_0$ ).

$M_w$  coincide con las estimaciones obtenidas mediante otras escalas, como por ejemplo la escala sismológica de Richter. Es decir,  $M_w$  permite entender la cantidad de energía liberada por el terremoto ( $M_0$ ) en términos del resto de las escalas sísmicas. Es por esto por lo que se usa  $M_w$  en vez de  $M_0$  como parámetro de la escala.

Los períodos de oscilación de las ondas sísmicas grandes son proporcionales al momento sísmico ( $M_0$ ). Es por esto por lo que se suele medir la magnitud de momento  $M_w$  a través de los períodos de oscilación por medio de sismógrafos.

$$M_w = \frac{2}{3} \left( \log_{10} \frac{M_0}{\text{N} \cdot \text{m}} - 9,1 \right) = \frac{2}{3} \left( \log_{10} \left( \frac{M_0}{\text{dina} \cdot \text{cm}} \right) - 16,1 \right)$$

Obsérvese que la magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ) se obtiene a partir de una función logarítmica con argumento adimensional y, por tanto, es una variable adimensional. En cambio, el momento sísmico ( $M_0$ ), al ser una variable que mide energía (fuerza x desplazamiento), tiene como unidad derivada la  $\text{N} \times \text{m}$  o  $\text{dina} \times \text{cm}$ . (Gibowicz 1975).

## **2.8. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.8.1. Atributo**

Las propiedades físicas y/o mecánicas se denominan "atributos". Los atributos continuos, como las concentraciones de metales o calidad de roca, se miden en una escala cuantitativa continua, mientras que los atributos categóricos toman solo un número limitado de estados, generalmente no ordenados, por ejemplo, la litología.

### **2.8.2. Variable**

La variable, está definida por el conjunto de posibles valores o indica que el atributo  $z$  o  $s$  puede tomar el control del área de estudio o en un punto en el vector de coordenadas  $u$ . En el último caso, la variable se denota  $Z(u)$  o  $S(u)$ .

### **2.8.3. Individualidad**

El valor del atributo se mide en una muestra física, como un trozo de roca o un sondaje extraído del campo. Donde, cada muestra física puede o no estar asociada a una ubicación en el espacio precisa en el área de estudio.

### **2.8.4. Población**

La población está definida como el conjunto de todas las mediciones del atributo de interés que podrían realizarse sobre el área de estudio. La colección finita de medidas disponibles se denomina muestra o conjunto de muestras.

### **2.8.5. Parámetro**

Los parámetros son cantidades constantes (no aleatorias) de un modelo, por ejemplo, el parámetro de rango de un modelo de semivariograma o el parámetro medio de una función de distribución de probabilidad logarítmica normal que modela un histograma.

### **2.8.6. Estadísticas**

Las estadísticas son cantidades que resumen una distribución, que puede involucrar varios atributos y/o varias ubicaciones en el espacio. Las estadísticas univariadas, bivariadas y multivariadas se relacionan, respectivamente, con uno, dos y múltiples atributos. La terminología estadística de un punto, dos puntos y múltiples puntos se usa cuando las variables se relacionan con el mismo atributo en una, dos y múltiples ubicaciones. Por ejemplo, el coeficiente de correlación es una estadística bivariada, mientras que el semivariograma es una estadística de dos puntos. El semivariograma cruzado es una estadística bivariada de dos puntos porque involucra dos atributos diferentes en dos ubicaciones diferentes.



## 2.9. ANTECEDENTES

Luis Quispe Mamani (2018) “Sistema de explotación en la Mina Catalina Huanca S.A.C. Sociedad Minera”, señala que la UM Catalina Huanca es un yacimiento cordillerano de tipo hidrotermal con minerales de mena como calcopirita, bornita, galena, esfalerita, enargita y tetraedrita; por otro lado los minerales de ganga lo constituyen la piritita, cuarzo, hematita, limonita y cuarzo operativamente sus tajos de producción se clasifican según el tipo de estructura, ya sea provenientes de mantos, cuerpos o vetas, llegando a la conclusión que los métodos de minado principales son corte y relleno ascendente y cámaras y pilares, para ambos métodos la evaluación geomecánica es primordial.

Martin de la Cruz Acebedo (2020) “Aplicación de Shotcrete vía húmeda para el sostenimiento de labores mineras en Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C.”, centra su investigación en la aplicación de shotcrete en la UM Catalina Huanca, ya que el sostenimiento de labores subterráneas corresponde hasta un 10% del costo total en las operaciones, buscando mejorar los resultados en el sostenimiento de labores y reducción de costos. Cambiando el diseño de shotcrete vía húmeda, llega a la conclusión, guiado por la recomendación geomecánica, que es posible incluso superando la resistencia estándar que tiene el shotcrete tradicional.

Gerald Mercado y Cecilia Obregon (2017) presentaron una tesis de investigación titulada “Modelamiento geomecánico a nivel de prefactibilidad de una mina subterránea”, que estudia lo referente al diseño geomecánico en una mina subterránea, usando investigaciones geomecánicas y geotécnicas constituidas por ensayos de permeabilidad, logueo geotécnico, y sondajes orientados para hacer un análisis de las orientaciones estructurales presentes en el macizo rocoso, usando un sistema de clasificación de RMR<sub>76</sub>, la investigación considera una perspectiva generalizada de un

estudio geomecánico basado en el modelamiento con el fin de brindar las sugerencias de sostenimiento que se puedan emplear en diferentes ámbitos.

Rubén Sandoval (2019) indica en su trabajo de investigación “Modelamiento geomecánico para la reducción de la incertidumbre del macizo rocoso, utilizando técnicas geoestadísticas en el estudio de prefactibilidad del Túnel Nazareth, cía. minera San Rafael”, que un modelamiento geomecánico, basado en la data generada por un logueo geotécnico y ensayos rutinarios de laboratorio, sirve para reducir la incertidumbre en la masa rocosa mediante el uso de técnicas geoestadísticas, relacionando la calidad del macizo rocoso espacialmente, tomando en cuentas las condiciones de la explotación mineral, en un estudio de prefactibilidad en la CIA San Rafael, el resultado es un modelo geomecánico que se diferencia significativamente del modelo geológico, por lo que resalta la importancia de generar este tipo de información de manera independiente.

## **CAPÍTULO III : CONTEXTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO DEL AREA DE ESTUDIO**

### **3.1. GEOLOGIA REGIONAL**

El yacimiento de Catalina Huanca se encuentra en la parte centro-sur del país, dentro de la subprovincia polimetálica de la Cordillera de los Andes del sur de Perú. La columna litoestratigráfica regional abarca desde el Pérmico hasta tiempos recientes. Las unidades más antiguas del Pérmico están representadas por el Grupo Mitu, compuesto por calizas, areniscas y conglomerados, que están cubiertos por sedimentos del Triásico superior y Jurásico inferior, representados por la Formación Socosani. La secuencia sedimentaria sigue con las rocas del Grupo Yura, que incluye las formaciones Puente, Cachios, Labra, Gramadal y Hualhuani. El Cretácico está caracterizado por areniscas y conglomerados gris-rojizos de la Formación Murco, junto con secuencias de calizas de la Formación Arcuquina. En el área afloran rocas intrusivas como dioritas y granitos, las cuales se formaron en dos periodos magmáticos distintos: el primero es el granito de Querobamba del Paleozoico inferior, y el segundo corresponde al Batolito Andino, intruido durante el Cretácico superior. (INGEMMET, 2003). (Véase fig. 3.1)

#### **3.1.1. Complejo Querobamba (Ps-q/gr)**

Este complejo consiste en un extenso cuerpo plutónico que aflora en las regiones meridional y septentrional de los cuadrángulos de Querobamba y Chincheros. Este cuerpo se extiende aproximadamente 40 km en longitud y 10 km en anchura. Esta unidad se ha clasificado en diversas facies: granítica, granito gneisificado, monzogranítica y granítica con cuarzo secundario.

### **3.1.2. Grupo Mitu (PsT-mi)**

Los sedimentos pelíticos del Grupo Mitu están compuestos por molasas rojas continentales que se depositaron en llanuras de inundación. Los niveles gruesos de conglomerados corresponden a depósitos piemontañosos proximales que se formaron bajo un régimen tectónico distensivo (bloques entre fallas). Los mejores afloramientos se encuentran en los sectores de los cerros Condorjojo, Chaija, Hatun Huerta, Pailopango, Hualla y Jojalla. En el cuadrángulo de Querobamba, esta unidad aparece como una franja delgada intercalada entre los afloramientos del Grupo Pucará. En el sector de Hualla, esta unidad presenta una alternancia de areniscas, calizas y conglomerados grises rojizos. Las areniscas son de grano fino y estratos delgados, mientras que los conglomerados gris rojizos contienen clastos subredondeados de naturaleza granítica y granodiorítica, incrustados en una matriz de arenisca arcósica. Los niveles conglomerádicos son más predominantes en la base de los afloramientos.

### **3.1.3. Grupo Pucará (TrJi-pu)**

Se identifican tres formaciones distintas:

#### **3.1.3.1. Formación Chambará**

Compuesta por calizas masivas gris-azuladas micríticas con numerosas vetas de calcita rellenadas en diversas direcciones, con un espesor promedio de 200 metros y una notable presencia de fósiles.

#### **3.1.3.2. Formación Aramachay**

Se encuentra expuesta en los alrededores de Morcolla y Silacaha (cuadrángulo de Querobamba). Está compuesta por calizas arcillosas de tonalidad marrón grisácea, intercaladas con calizas en capas delgadas, y con presencia frecuente de nódulos calcáreos de hasta 8 cm de

diámetro. Los estratos muestran un intenso plegamiento. En las cercanías de Hojaraila y Tranca también se pueden observar manifestaciones de esta misma unidad.

### **3.1.3.3. Formación Condorsinga**

Se encuentra expuesta en los alrededores de Sillacha y Parantuna (Querobamba). Esta unidad está compuesta por calizas gris-azuladas en estratos de espesor medio, con numerosas vetas de calcita que sobresalen sobre los niveles de caliza arcillosa de la Formación Aramachay.

Los afloramientos del Grupo Pucará en áreas cercanas, como el oeste de Huancapi, el suroeste de Uripa, Minas Canarias (Catalina Huanca) y el poblado de Morcolla, muestran una secuencia geológica que va desde el Pérmico medio-superior al Triásico inferior, subyacente al Grupo Yura que abarca desde el Jurásico superior al Cretácico inferior.

### **3.1.4. Formación Socosani (Js-s)**

Esta unidad está compuesta principalmente por una alternancia de calizas macizas, limolitas calcáreas, calizas arenosas y calizas dolomíticas. Las calizas son de color gris claro y se encuentran en estratos de medianos a gruesos, con numerosas vetas de calcita. Se estima que su grosor es de aproximadamente 350 metros. Esta unidad yace sobre el Complejo de Querobamba en un contacto concordante. Se observa un adelgazamiento notable de estos estratos, indicando la presencia de una zona de transición. La edad de la Formación Socosani abarca desde el Toarciano superior hasta el Bajociano superior, y está correlacionada con la formación Río Grande en la región de Nazca.

### **3.1.5. Grupo Yura (Js-gr / Js-la)**

La formación Yura está compuesta por una secuencia sedimentaria gruesa que incluye areniscas, lutitas y calizas, dividida en cinco miembros de abajo hacia arriba: Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani, con una edad estimada del Oxfordiano al Neocomiano inferior.

En las imágenes satelitales, esta unidad muestra una orientación NO-SE, formando anticlinales y sinclinales de tonos grisáceos a amarillentos, con patrones de drenaje subparalelos a subdendríticos. Se observan áreas resistentes a la erosión donde afloran areniscas y cuarcitas, así como zonas intensamente erosionadas en los niveles calcáreos.

En el área de estudio, el ciclo andino comenzó en el Triásico superior - Jurásico inferior, con sedimentación en una elevación sumergida (intrusivo Querobamba), donde se depositaron las calizas del Grupo Pucará. Posteriormente, se depositaron los sedimentos de la Formación Socosani, el Grupo Yura, y las formaciones Murco y Arcurquina.

### **3.1.6. Formación Murco (K-m)**

En los cerros Huasichara y Salquia se pueden observar exposiciones prominentes de esta unidad. Los afloramientos están afectados por diversas fallas inversas. Desde el punto de vista litológico, esta unidad está formada por calizas arcillosas, arcillas y areniscas de grano fino con tonalidades que van desde el rojo hasta el púrpura, debido a la presencia de óxidos de hierro.

Las calizas arcillosas y las arcillas muestran laminación y presentan colores que varían entre verde y rojo. La Formación Murco se encuentra en contacto concordante con la Formación Hualhuani y se intercala de manera similar con la Formación Arcurquina. Por su posición estratigráfica, se considera que esta unidad corresponde a la edad del Barremiano-Aptiano.

### **3.1.7. Formación Arcurquina (K-aq)**

Esta formación se encuentra en el sector NE del cuadrángulo de Santa Ana, específicamente en los cerros Huasichara y Ocrocancha, como parte del flanco occidental del anticlinal. En los alrededores de Santa Magdalena, en el sector sureste del cuadrángulo de Puquio, se han identificado afloramientos de niveles calcáreos que corresponden a la Formación Arcurquina.

Desde el punto de vista litológico, la formación está compuesta por calizas de tono gris oscuro en estratos que varían de delgados a gruesos, con pequeñas vetas de calcita intercaladas y presencia de calizas arcillosas que incluyen nódulos lenticulares de color pardusco en niveles inferiores.

Las calizas arcillosas exhiben mayor plasticidad e incompetencia, lo que facilita el desarrollo de pliegues desarmónicos dentro de estructuras más grandes. La Formación Ferrobamba se asigna a la edad del Albiano-Cenomaniano inferior. (Ver fig. 3.1).

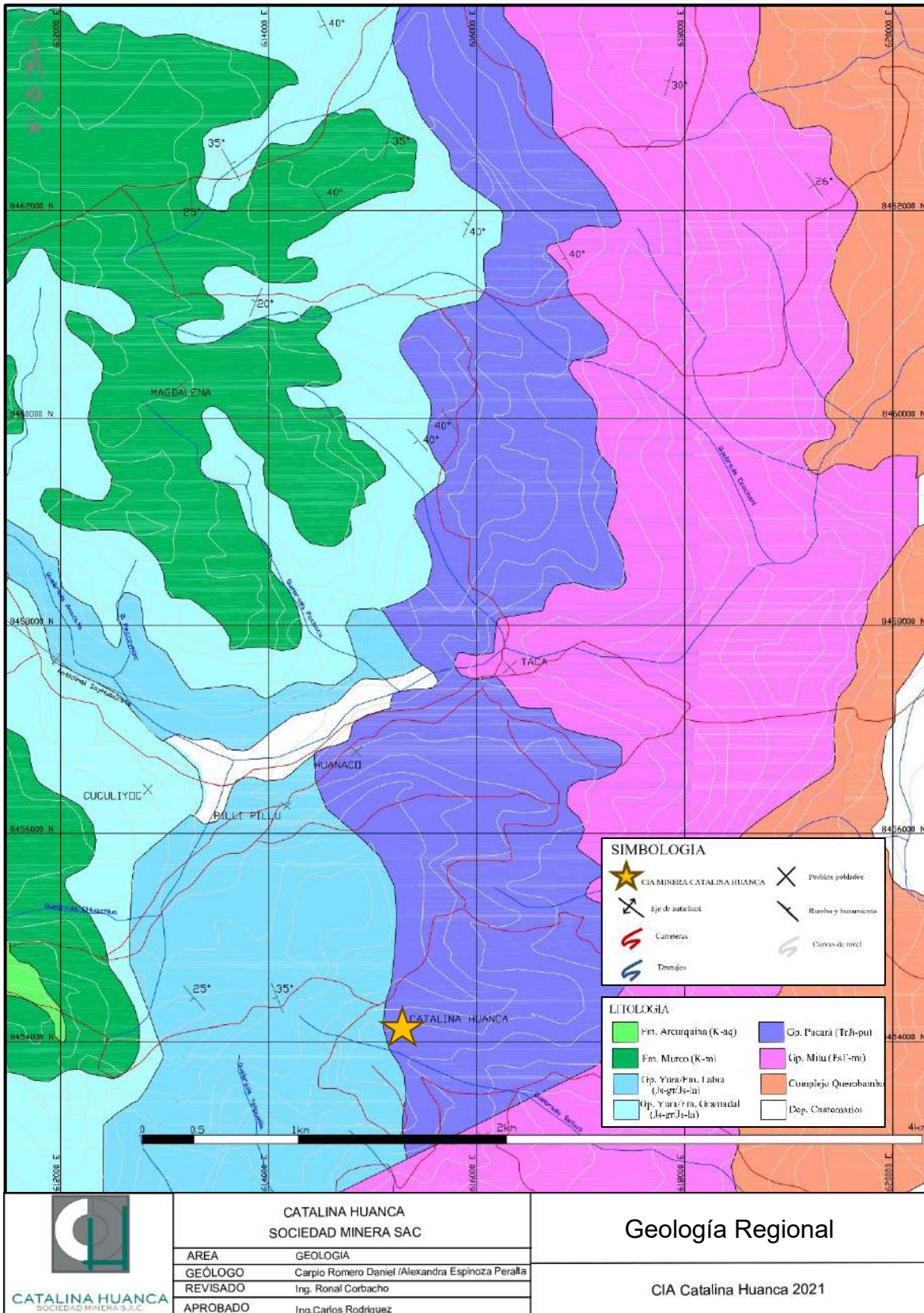


Figura 3.1 Geología Regional. (Fuente CIA Catalina Huanca 2021)



## **3.2. GEOLOGIA LOCAL**

El yacimiento Catalina Huanca está situado en las laderas de los cerros Hatun Orcco (4000 m sobre el nivel del mar) y Monteruyocc, donde la quebrada Sacllani, que actúa como el principal canal de drenaje superficial, se une al río Mishca. A lo largo del valle del Mishca, es posible observar toda la secuencia estratigráfica presente en la mina. (ver figura 3.2).

### **3.2.1. Complejo Querobamba ((Ps-q/gr))**

En la base, cerca del nivel del río Mishca a 2400 m sobre el nivel del mar, se encuentran afloramientos de rocas pertenecientes al complejo granítico Querobamba y granitos gnéissicos. Se pueden observar huellas frecuentes de antiguas exploraciones y trabajos mineros que siguen vetas compuestas por cuarzo blanco y limonita. Además, se observan estructuras de foliación con orientación N 30 – 35° E y buzamiento vertical. En los taladros de exploración UDH-01662, UDH-01785, UDH-01828 y UDH-02222, a una altitud de 2239 m sobre el nivel del mar, se ha interceptado un intrusivo granítico con fenocristales de ortosa maclada, cuarzo, venillas y presencia dispersa de pirita.

### **3.2.2. Conglomerado del Grupo Mitu (PsT-mi)**

Esta secuencia aflora a una elevación superior a 2800 m sobre el nivel del mar y está compuesta por pseudoestratos monótonos. Estos pseudoestratos están compuestos por fragmentos subredondeados de arenisca, cuarzo, cuarcita, caliza, lutita y roca volcánica, en una matriz de color violeta rojiza. Las capas tienen un rumbo de N 10° O y un buzamiento de 30° hacia el suroeste. En los estratos inferiores se puede observar una alternancia de calizas conglomerádicas y facies silíceas y calcáreas, que incluyen clastos de cuarzo y arenisca en una matriz arcillosa a arenosa, a

menudo con presencia de hematita ferruginosa y de color gris rojizo. Estas rocas generalmente están mineralizadas, conocidas como Doña María, Doña María Piso y Silvia.

Estratigráficamente, estos pseudoestratos tienen espesores que varían de 0.8 a 3.0 metros y están compuestos por fragmentos subredondeados de arenisca, cuarzo, cuarcita, caliza, lutita y roca volcánica en una matriz violeta rojiza. En los niveles inferiores, se pueden observar conglomerados de facies silíceas y calcáreas, que contienen clastos de cuarzo y arenisca en una matriz arcillosa a arenosa, a menudo con hematita ferruginosa y de color gris rojizo. Además, se encuentran areniscas de grano medio de color gris intercaladas con limolitas de diferentes colores como gris, beige, verde, violeta y marrón. Las facies superiores consisten en variaciones de conglomerados, principalmente polimícticos y alterados, de color marrón, rojizo grisáceo y beige grisáceo debido a alteraciones argílicas y contenido de óxidos de hierro. Los conglomerados polimícticos verdosos están más asociados con la alteración de la matriz, tanto por clorita como por epidota. Aunque los clastos son principalmente polimícticos, también hay facies diferenciadas de conglomerados calcáreos y silíceos. En este tipo de litologías se encuentran los cuerpos mineralizados conocidos como Doña María Piso, Doña María, Nancy, Melissa y Gloria. (Ver fig. 3.3).

### **3.2.3. Grupo de calizas Pucará (TrJi-pu)**

A una altitud de 3450 m sobre el nivel del mar, las calizas del Grupo Pucará afloran en la cúspide del cerro Hatun Orcco. Se observa una secuencia de estratos delgados a medianos, intercalados con horizontes brechosos, rocas tufáceas y sill de andesita. Las capas siguen principalmente un rumbo de N 20° E, con un buzamiento de 27° hacia el noroeste. A nivel local, se estima que el espesor de las calizas alcanza los 800 m. Este grupo está compuesto por tres formaciones: Condorsinga (150 m), Aramachay (100 m) y Chambará (500 m), las cuales forman corredores estructurales conocidos como Chumbilla–Monteruyoc– Sayhuacucho y Lampaya, de

norte a sur. Estas unidades son de interés significativo para la exploración de metales base en una extensión aproximada de 1,6 km, asociada con diques dacíticos y andesitas porfíricas propilitizadas. (Ver fig. 3.3).

La secuencia de calizas comprende estratos delgados a medianos, intercalados con horizontes brechosos, rocas tufáceas y sill de andesita, con un espesor estimado de 800 metros. Presenta diversas facies: en las capas inferiores a medias se encuentran calizas de grano fino a medio y de color gris, seguidas por calizas de tonos gris rojizo a gris intercaladas con calizas fosilíferas. En las capas superiores predominan calizas bituminosas de color gris oscuro, alternadas con calizas con alteración argílica. En estas facies litológicas se localizan los cuerpos mineralizados conocidos como Silvia, Mariela y Milet.

#### **3.2.4. Depósito coluvial (Qh-co)**

Estos depósitos se encuentran en las laderas del valle y son el resultado de procesos como meteorización, erosión y deslizamiento de suelos hacia el lecho principal. Están compuestos por bloques de roca, gravas de forma angulosa a subangulosa, así como gravillas y arena limosa. En el área de estudio, estos depósitos también incluyen material caído debido a la construcción de carreteras y la remoción de tierra.

#### **3.2.5. Depósito aluvial (Qh-al)**

Está compuesto por una mezcla de depósitos aluviales y coluviales, principalmente formados por bolones de roca, gravas de forma subangulosa a redondeada, así como gravillas, arenas limosas y arcillas. Estos depósitos se originan principalmente debido a la erosión glacial del macizo rocoso circundante y al transporte aluvial.

### **3.2.6. Depósito fluvial (Qh-fl)**

Son depósitos arrastrados por las corrientes, resultado de las lluvias que caen y se acumulan tanto en el lecho como en las orillas del río Mishca. Litológicamente se compone por intercalación de arenas, limos, arcillas y clastos sub redondeados a redondeados, cantos y bloques rocosos de diferentes tamaños, acumulados en bancos de conglomerados no consolidados. Se encuentran acumulados principalmente en el cauce del río Rajaure y Mishca.

### **3.2.7. Rocas ígneas**

En el cerro Monteruyoc se encuentra expuesto un depósito riolítico subvolcánico, próximo al límite entre rocas calizas y conglomerados. Estas formaciones subvolcánicas parecen estar asociadas con la alteración hidrotermal de las unidades encajonantes. En la zona metalotécnica de Pucará (calizas) y Mitu (conglomerado), se pueden observar intercalaciones de diques riódacíticos y andesitas porfiríticas sideritizadas. El contacto intrusivo entre las rocas calizas y las subvolcánicas sigue una dirección N 24° E y un ángulo de inclinación de 29° al noroeste. Además, la región presenta la presencia dispersa de rocas plutónicas intrusivas de composición diorítica, que datan del Mioceno. (Ver fig. 3.2).

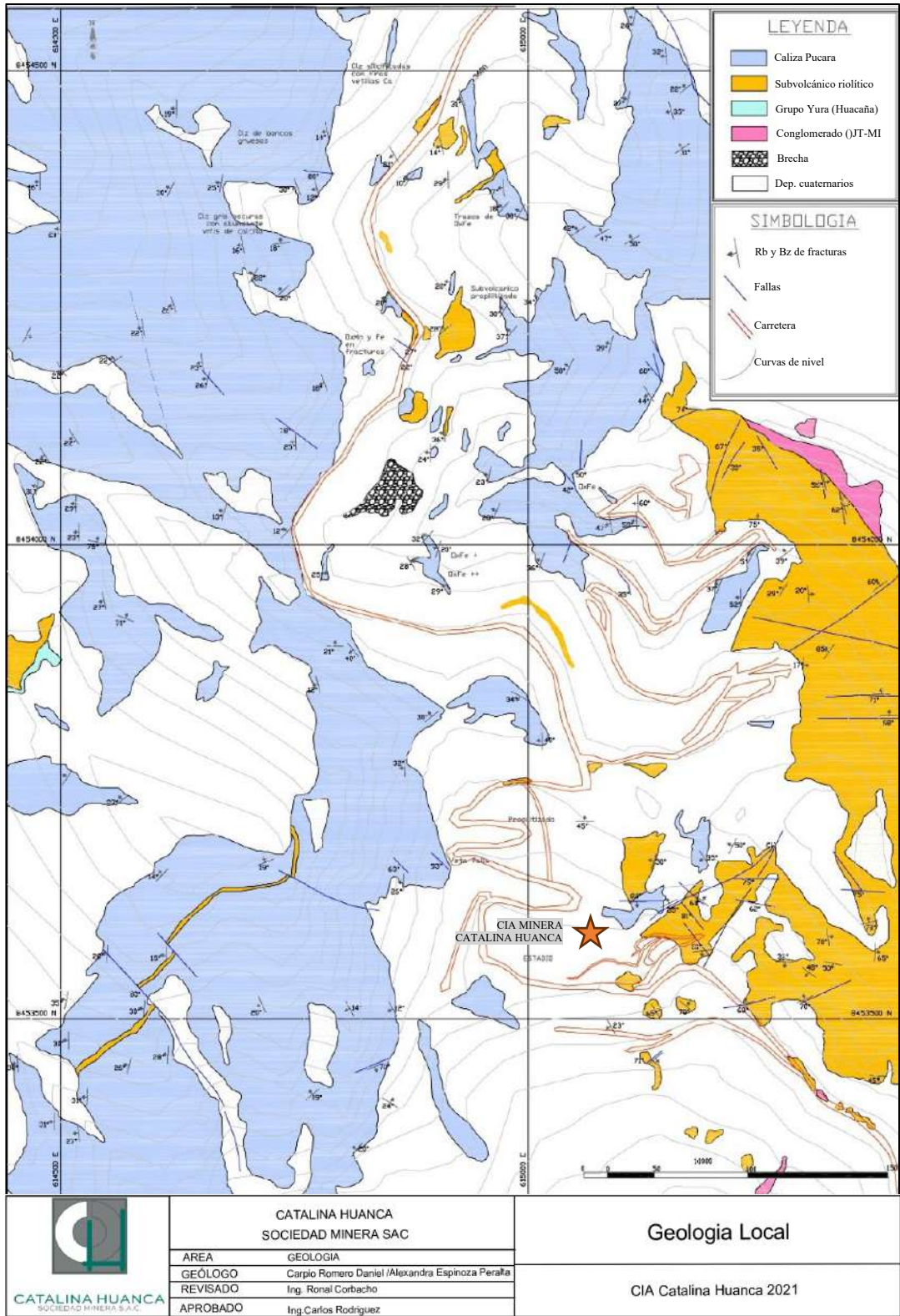


Figura 3.2 Geología local (Fuente CIA Catalina Huanca 2021)

ERA	SYSTEM	SERIES	UNIT	AP PROX. THICKNESS (m)	COLUMN	LITHOLOGICAL DESCRIPTION
CENOZOIC	QUATERNARY	HOLOCENE	ALLUVIUM			Blocks, gravels, sands and unconsolidated silts
			COLLUVIUM			
	PLEISTOCENE		FLUVIOGLACIAL DEPOSIT			Blocks, gravels, sands and slightly consolidated silts
			MORAINE DEPOSIT			
MESOZOIC	JURASSIC	UPPER	YURA GROUP			In the upper parts of the zone fossiliferous limestone sequences can be distinguished interspersed with thin layers of lutites. Towards the top can be observed layers of sandstone. Thrust overlapping the Pucara group
	TRIASSIC	UPPER	PUCARA GROUP	>750		Thrust overlapping the Mitu group. Formed by dark gray limestones in thick bench interspersed with some sandstone layers and thin strata of dark lutite, which were folded and faulted by tectonic activity corresponding to the Andean orogeny with a NE-SW regionally oriented structure
PALEOZOIC	PERMIAN	UPPER	MITU GROUP	>800		Polymictic conglomerates formed by sandstone clasts, limestones and quartzite embedded in a clayey to sandy ferruginous matrix and reddish gray calcareous rocks
			QUEROBAMBA COMPLEX			

Figura 3.3 Columna estratigráfica local (Fuente CIA Catalina Huanca 2021)

### **3.3. GEOMORFOLOGIA LOCAL**

El área de estudio se sitúa en el flanco Este de la Cordillera Occidental, caracterizada por una topografía extremadamente irregular. Las pendientes varían desde suaves en las partes altas hasta abruptas en las zonas bajas e intermedias. Se observan quebradas amplias en las áreas altas, que se estrechan y encañonan en las partes medias y bajas. Las quebradas superiores tienen forma amplia y profunda, similar a la letra "U", resultado de la glaciación del Pleistoceno, con algunos suspendidos en el aire debido a este fenómeno. En las partes inferiores, las quebradas son profundas y encañonadas, con forma tipo "V", indicativas de una incisión vertical activa. Más abajo, los canales se estrechan y encañonan aún más, con flancos que generalmente muestran depósitos aluviales y coluvio-aluviales, evidenciando un nivel base anterior y señales de un aumento en la profundización del cauce debido a las lluvias.

Esta área pertenece a la unidad geomorfológica conocida como Valle Interandino. Esta unidad se caracteriza por tener flancos con pendientes pronunciadas que van desde 35° hasta 60° en promedio, llegando a picos de hasta 85°. Además, se destacan los valles que carecen de techos fluviales definidos. Las llanuras de inundación de los ríos en las zonas de origen tienen un ancho promedio de aproximadamente 20 metros.

### **3.4. GEOLOGIA ESTRUCTURAL LOCAL**

En la zona de estudio se han registrado varios ciclos tectónicos significativos, destacando los siguientes:

Ciclo Hercínico:

- Eohercínica: este ciclo ocurrió durante el Devónico-Misisípico y marcó la separación entre los ciclos de sedimentación del Paleozoico Inferior y Superior. (Megard F. 1978)

- Tardihercínica: este ciclo incluyó evidencias de compresión y fracturamiento, notables en las rocas del granito de Querobamba, y se estima que tuvo lugar durante el Permiano Medio.

Ciclo Andino: ocurrió después de la etapa de sedimentación que se registró en el Triásico superior, la cual incluyó la presencia de rocas carbonatadas pertenecientes al Grupo Pucará.

- Fase peruana: se desarrolló durante el Cretácico Superior-Senoniano y resultó en plegamientos de las coberturas triásico-liásicas.
- Fase Incaica: originó plegamientos en secuencias sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico.
- Fase quechua: esta fase afectó principalmente a los emplazamientos descritos anteriormente.

Durante el proceso de mineralización en Catalina Huanca, se produjo una compresión general con dirección Oeste-Este, lo cual contribuyó a la expansión de las fallas preexistentes o de aquellas en formación activa. Estas fallas son de tipo transcurrente con ángulos altos a casi verticales (tipo cizalla), con orientaciones predominantes NE-SO (como la veta principal), y variando hacia E-NE, O-SO (vetas Piedad, 3 Techo y Vilma), y EO (veta Lucero). Se considera que a través de estas fallas transcurrentes de ángulos altos a verticales, los fluidos mineralizantes ascendieron para mineralizar los estratos de Mitu y Pucará en el área de la mina. (véase figura 3.5).

La misma compresión general con dirección Oeste-Este ( $\sigma_1$ ) también jugó un papel crucial en la formación de fallas de ángulo bajo, las cuales parecen haber desplazado las secuencias de Mitu y Pucará en el área de la mina durante el proceso de mineralización. Estas fallas actuaron como sobreescurrecimientos, rampas estructurales (incluidas rampas laterales), estructuras tipo dúplex y vetas sigmoidales, además de fallas de estratificación, especialmente evidentes en la roca caliza de Pucará. Las ondulaciones de bajo ángulo presentes en estas fallas también facilitaron el flujo de fluidos mineralizantes.



Los movimientos tanto de las fallas de ángulo alto a vertical como de las de ángulo bajo, como respuesta al esfuerzo tectónico que las formó, permitieron la intrusión de rocas subvolcánicas ácidas en forma de diques y sills. Además, la reactivación de las estructuras a través de las cuales estas rocas subvolcánicas fueron inyectadas, mediante el corte de las propias rocas subvolcánicas o de sus márgenes, facilitó el flujo de fluidos mineralizantes dentro de las rocas subvolcánicas a lo largo de sus contactos con los sedimentos de Mitu y Pucará. (Ver fig. 3.4).

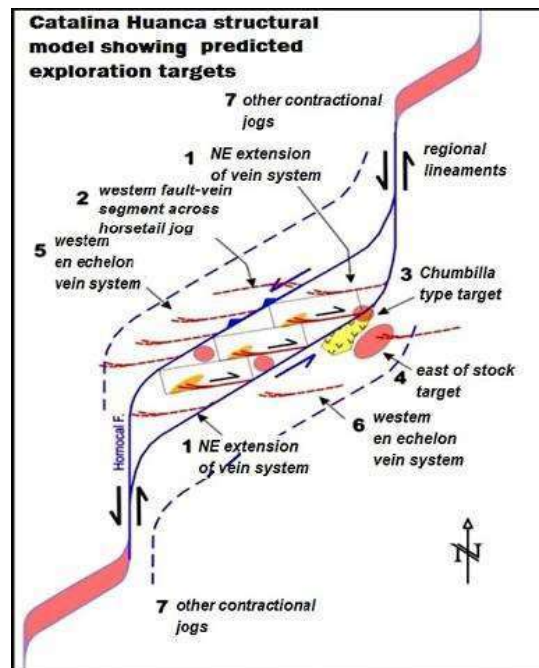


Figura 3.4 Modelo estructural (Fuente Erick Nelson, consultor de CHSM)

En Catalina Huanca, las fallas de ángulo alto a vertical atraviesan todas las secuencias del Grupo Mitu, incluidas las facies conglomerádicas y arenosas, mientras que las fallas de ángulo bajo siguen más fácilmente las facies volcánico-arenosas de grano medio a fino. Esto podría explicar por qué la mineralización dentro de la secuencia del Grupo Mitu parece estar preferentemente asociada con facies no-conglomerádicas (como calcáreas y roca caliza arenosa) entre las fallas.

Las fallas de ángulo alto a vertical no suelen extenderse mucho al atravesar la secuencia del Grupo Pucará de las rocas Mitu, presumiblemente debido a la presencia suficiente de fallas de ángulo bajo (sobreescurrimientos, fallas de estratificación, rampas estructurales) que redistribuyen la tensión. En el Grupo Pucará, la mineralización tiende a estar controlada estratigráficamente (más favorable en horizontes de estratificación paralela) o estructuralmente a lo largo de la estratificación paralela o sub-paralela, incluyendo fallas de bajo ángulo, rampas estructurales, rampas laterales y estructuras sigmoidales como dúplex estructurales.

Según la investigación realizada en Catalina Huanca por el Dr. Eric Nelson, se encontraron estructuras tipo cola de caballo que incluyen pliegues, fallas veta con un buzamiento pronunciado, y fallas veta inversas (cabalgamientos) de bajo buzamiento y estratificación local paralela, indicando un sistema clásico de falla inversa tipo rampa rellano, típico en estratos bien estratificados de caliza y lutita. Los bloques de cabalgamiento dentro de las ramas de las fallas veta muestran una variedad de mineralización, incluyendo mineralización de reemplazo y de tipo veta.

En cuanto al estudio y análisis de las vetas con buzamiento pronunciado y orientación Noreste (como la veta Principal y Amanda 3 Techo al oeste de los cuerpos tipo manto), se considera que podrían corresponder a fallas sinestrales (oblicuas-inversas). Estas fallas-veta con rumbo NE limitarían la mineralización conocida en este corredor.

#### **3.4.1. Sistemas de fallas**

En el área de estudio, las características litológicas muestran evidencias de plegamientos con ejes sub-paralelos al recorrido del río Mischa. Se observan alineamientos principales con orientaciones N-S, y en menor medida NW-SE, especialmente en los ejes de quebradas y contactos litológicos. La zona es estructuralmente compleja, con presencia de fallas y pliegues, cercana a

alineamientos regionales que se orientan hacia el Norte, Noreste y Noroeste. Además, hay una serie de intrusiones subvolcánicas asociadas a la mineralización, controladas por diques, sills y stocks intrusivos.

La secuencia estratigráfica desde el grupo Mitú hasta la formación Chunumayo ha experimentado ciclos de esfuerzos de compresión y distensión, especialmente durante el ciclo Andino. Este levantamiento regional resultó en plegamientos regionales y fallamientos locales, como la falla Hornocal y otras mencionadas en detalle a continuación.

El sobreescorrimiento Chumbilla, definido por el contacto entre las calizas Pucará, la roca intrusiva y los conglomerados, tiene un rumbo N 40° E y un buzamiento de 30° al Noroeste. Este sobreescorrimiento ha controlado los cuerpos mineralizados de plomo y zinc conocidos como Nancy, Chumbilla y otras vetas similares.

El sobreescorrimiento Sayhuacucho, con un rumbo nor-nordeste y buzamiento entre 30° y 50° al Noroeste, se originó en una zona de cizalla y repliegues en las calizas del grupo Pucará. Este fenómeno ha generado condiciones favorables para el desarrollo de mineralización en estas áreas.

El sobreescorrimiento Chumbilla, definido por el contacto entre las calizas Pucará y la roca intrusiva y los conglomerados, de rumbo N 40° E y buzamiento 30° NO, controló los cuerpos mineralizados de plomo y zinc denominados Nancy, Chumbilla y otras vetas similares.

El sobreescorrimiento Sayhuacucho de rumbo nor-noreste y buzamiento entre 30° a 50° NO, originado a partir de una zona de cizalla y repliegues en calizas del grupo Pucará generó zonas apropiadas para el desarrollo favorable de mineralización.

El stock riolítico ubicado en el lado este y el dique diorítico ubicado en el lado oeste de la mina, han aprovechado los planos de debilidad producidos por los sobreescurrecimientos para penetrar las rocas encajonantes.

La falla Hornocal que se extiende por más de 1 km y ha sido identificada en el crucero 187, nivel 3000, presenta material de roca caliza brechada con una matriz subvolcánica. El área de influencia de la falla puede ser muy ancha (>100m en el crucero 187), a pesar de que no se tiene un conocimiento total de su grado de influencia.

### **3.4.2. Discontinuidades**

Las discontinuidades presentes en la unidad son de una gran variabilidad, tanto en sus características físicas como en su extensión. A mayor escala las discontinuidades incluyen áreas divisorias del macizo rocoso como son fallas geológicas, contactos entre los diferentes tipos de litología; y en menor escala diversos tipos de familias de fracturas, estratificación, foliaciones y diaclasas.

Para establecer las características de distribución de discontinuidades o arreglo estructural de la masa rocosa en la estructura Doña María Piso, se utilizaron técnicas estereográficas para procesar los datos orientacionales obtenidos. Estos datos provienen del mapeo geomecánico realizado dentro de la roca mineralizada, específicamente entre los Niveles 2,750 y 2,850 de las labores subterráneas.

En la estructura Doña María Piso se identificaron tres sistemas principales (Sistemas 1, 2 y 3) y dos secundarios (Sistemas 4 y 5). El Sistema 1 muestra un rumbo promedio de NNE con un alto buzamiento hacia el SE. El Sistema 2 tiene un rumbo promedio NW con un alto buzamiento dirigido al NE. El Sistema 3 presenta un rumbo de NNW con alto buzamiento hacia el NE.

En cuanto a los Sistemas 4 y 5, tienen una presencia menor en comparación con los sistemas principales. El Sistema 4 tiene un rumbo NE con alto buzamiento orientado hacia el NW. Por otro lado, el Sistema 5 muestra un rumbo NWW con un buzamiento moderado a alto dirigido hacia el SW. Estas características estructurales son fundamentales para entender la distribución de discontinuidades y la geometría de las masas rocosas en esta área minera específica.

En la estructura Melissa, se observa la presencia de cinco sistemas principales con similar porcentaje de presencia. El Sistema 1 está orientado con rumbo promedio de NNW con moderado a alto buzamiento dirigido al NE. En el caso del Sistema 2, este presenta rumbo NNE con fuerte buzamiento dirigido hacia el SE. En el caso del Sistema 3 este presenta rumbo NW y tiene alto buzamiento orientado hacia el SW. Los Sistemas 4 y 5 tienen similar rumbo NE con moderado a alto buzamiento orientado hacia el NW y SE respectivamente. (Tabla. 3.1). (Ver fig. 3.5). (Ver fig. 3.6). (Ver fig. 3.7).

Un resumen de estos resultados se presenta en el siguiente cuadro donde se indica el aspecto estructural para el Manto Doña María Piso, el Manto Melissa y el compósito de ambos mantos.

SECTOR	SISTEMA 1	SISTEMA 2	SISTEMA 3	SISTEMA 4	SISTEMA 5
Doña Maria Piso	N19°E/67°SE	N49°W/77°SE	N22°W/64°NE	N59°E/78°NW	N70°W/63°SW
	109°/67°	041°/77°	068°/64°	329°/78°	200°/63°
Melissa	N15°W/62°NE	N15°E/76°SE	N54°W/75°SW	N56°E/60°NW	N57°E/72°SE
	075°/62°	105°/76°	216°/75°	326°/60°	147°/72°
Composito	N22°E/70°SE	N17°E/65°SE	N48°W/77°SE	N58°E/68°NW	N60°W/65°SW
	112°/70°	073°/65°	042°/77°	328°/68°	210°/65°

*Tabla 3.1 Sistema de discontinuidades estructurales (Rumbo/buzamiento – Dip buzamiento/buzamiento) (Fuente DCR ingenieros, consultor de CHSM)*

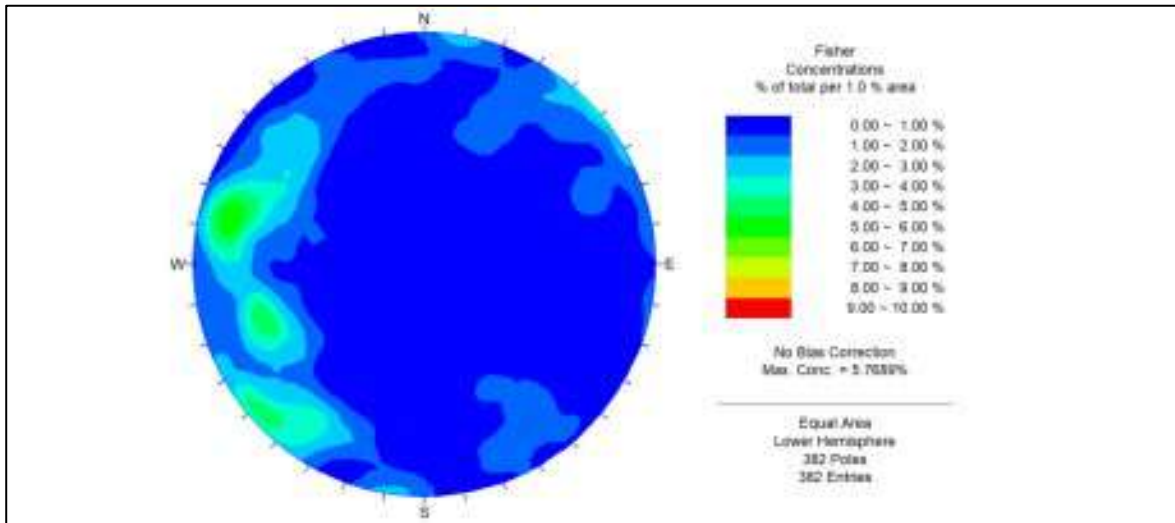


Figura 3.5 Diagrama estereográfico de contornos (compósito Doña María Piso y Melissa). (Fuente DCR ingenieros, consultor de CHSM)

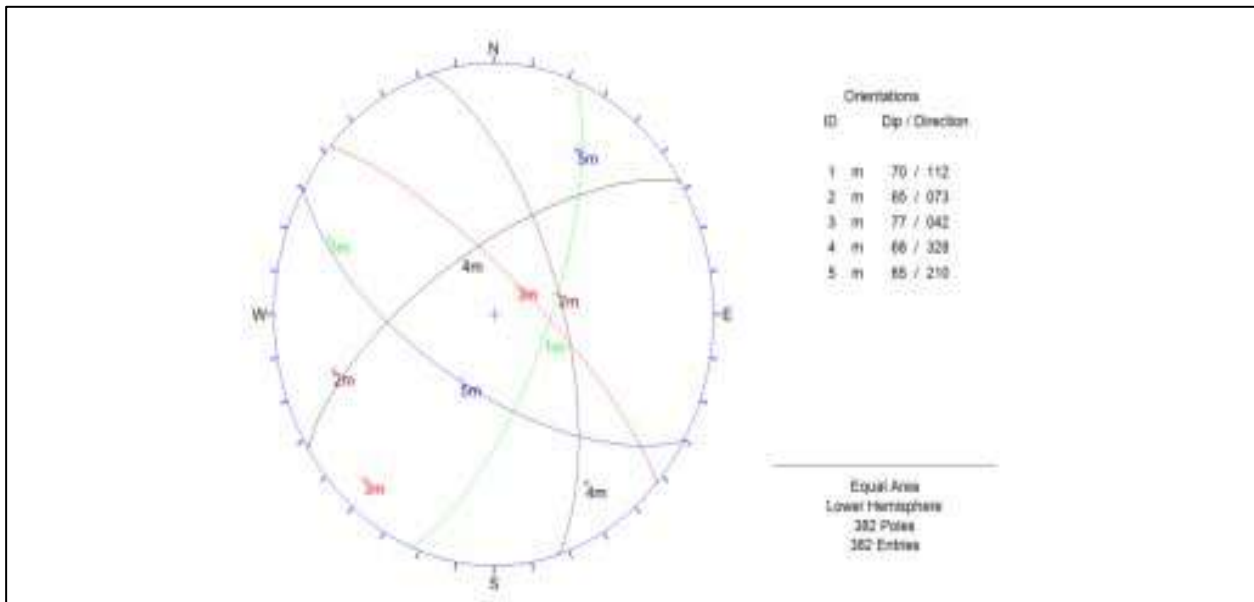


Figura 3.6 Diagrama estereográfico de planos principales (compósito Doña María Piso y Melissa). (Fuente DCR ingenieros, consultor de CHSM)

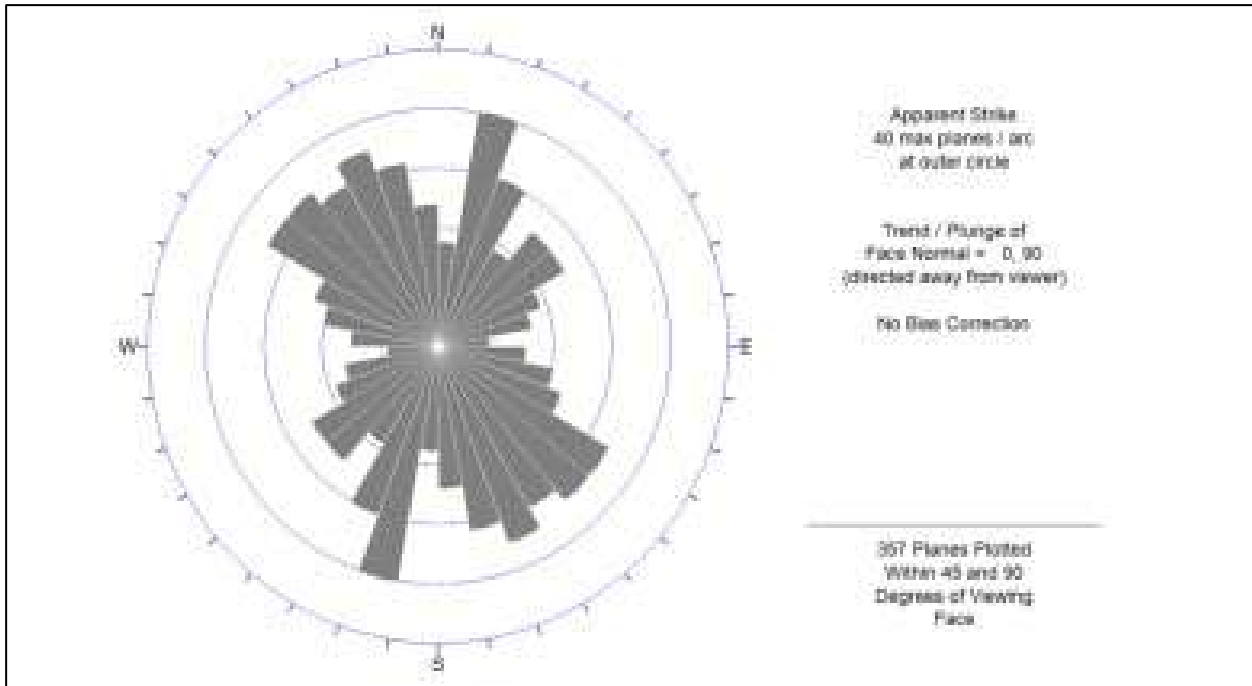


Figura 3.7 Diagrama de roseta (compósito Doña María Piso y Melissa). (Fuente DCR ingenieros, consultor de CHSM)

### **3.5. HIDROGEOLOGIA LOCAL**

La hidrogeología dentro la mina incluye una interacción compleja entre aguas superficiales, subterráneas y las operaciones mineras, como la influencia de la excavación en el flujo de las aguas subterráneas y la calidad de estas. Es crucial poder entender la estratigrafía local, la recarga de acuíferos y la dirección del flujo subterráneo para gestionar adecuadamente el agua en la mina y prevenir problemas como las inundaciones y la contaminación del agua.

El área de estudio se encuentra ubicada en el flanco Este de la Cordillera Occidental, con topografía muy irregular, desde pendientes suaves en las partes altas y accidentada hasta abrupta en las partes bajas e intermedias. La región climática de las microcuencas Puccharge, Apongo y Sacellani, según el mapa climático Senamhi se caracteriza por ser lluviosos y húmedos en verano, y secos fríos en las estaciones de otoño e invierno. Mediante Isoyetas y la relación precipitación Vs Altitud, se determinó en el área una precipitación media anual que varía entre 600 - 700 mm/año. La Temperatura media (13.6), mínima (3.8) y la máxima alcanza 21.2 °C.

#### **3.5.1. Unidades hidrogeológicas reconocidas en mina**

Tomando como referencia el análisis hidrogeológico del área de estudio, se han identificado 4 unidades hidrogeológicas distintas. Estas unidades incluyen conglomerados (Grupo Mitu), areniscas calcáreas (también del Grupo Mitu), calizas (Formación Chunumayo), y suelos cuaternarios (fluvioglaciares). Para determinar y delimitar estas unidades hidrogeológicas en el área del proyecto, se utilizaron datos de estudios previos realizados entre 2010 y 2012 por BISA, así como estudios hidrogeológicos llevados a cabo por Hidroandes Consultores S.A.C. Estos datos fueron agrupados según las unidades geológico-litológicas atravesadas por cada sondeo, junto con la profundidad de los ensayos hidráulicos realizados, lo que permitió reconocer y diferenciar



claramente estas unidades en el subsuelo, que a continuación se describen de manera preliminar en la (Tabla 3.2).

Unidades Hidroestratigráficas	Conductividad Hidráulica		Espesor (m)	Clasificación según su transmisividad
	(cm/s)	(m/d)		
<i>Suelos Cuaternarios</i>				
Fluvioglaciario, gravas y arcillas	2.3E-03 a 2.9E-03	2.0 a 2.5	5 a 10	Acuitardo
<i>Roca</i>				
Gpo. Pucará: Calizas poco fracturadas	2.5E-03 a 4.3E-03	2.0 a 3.75	>300	Acuífero (karstificado)
Gpo. Mitu: Conglomerados	4.7E-05 a 1.2E-04	0.04 a 0.11	>500	Acuicludo
Gpo. Mitu: Areniscas, lutitas y volcánicos.	1.4E-04 a 1.5E-04	0.12 a 0.13	>500	Acuicludo

Tabla 3.2 Unidades hidrogeológicas del área de estudio (Fuente investigaciones Hydroandes Consultores SAC Dic 2016- Feb 2017.y BISA 2010 – 2012)

Estas unidades hidrogeológicas están influenciadas por un control estructural significativo. Las diaclasas, fallas y estructuras mineralizadas como vetas desempeñan un papel crucial en el control hidráulico de las aguas subterráneas. En las partes altas de las cuencas, la recarga pluvial se genera principalmente a través de estas estructuras, donde las fallas y diaclasas actúan como los principales conductos de flujo dentro del subsuelo.

### 3.5.1.1. Acuífero calcáreo, calizas de la Formación Pucará – Chunumayo

En el área de estudio, el Grupo Mitu se evidencia entre las quebradas Hornocal, Yalipueña y Sacellani. En la parte inferior de este grupo predominan conglomerados polimícticos con fragmentos sub-redondeados y sub-angulosos de rocas volcánicas, cuarcitas y lutitas, en una matriz arcillosa con tonalidades rojizas o violáceas. Estos conglomerados están moderadamente cementados y poseen una baja conductividad hidráulica. Algunos estratos más permeables y fracturados dentro de esta unidad pueden actuar como "acuicludos a acuitardos", formando el substrato rocoso del área de estudio.

Sin embargo, es importante señalar que estas rocas también contienen margas con presencia de sulfatos, lo cual le confiere una baja resistencia a la compresión y las hace solubles al contacto con el agua. Esta característica puede influir significativamente en la hidrología subterránea y en la estabilidad geotécnica de la zona.

#### **3.5.1.2. Acuicludo, areniscas calcáreas del Grupo Mitú**

Durante las investigaciones hidrogeológicas, las perforaciones atravesaron diversos materiales geológicos en el área de estudio. Se encontraron materiales volcánicos sedimentarios pertenecientes al Grupo Mitu, así como depósitos carbonáticos del Grupo Pucara y la Formación Chunumayo, compuesta por areniscas conglomerádicas calcáreas de grano fino a medio. Estas formaciones se diferencian por su resistencia, con excepciones donde afloran horizontes de lutitas y limolitas, principalmente en la parte superior de la secuencia y en proporciones menores a las areniscas y conglomerados. Estos estratos delgados están asociados con horizontes yesíferos.

Esta unidad condiciona las surgencias de agua subterránea con nula transmisibilidad determinando zonas de bajas producción de aguas subterráneas, clasificándolo como “acuicludo a acuitardo” estas rocas tiene baja densidad de fracturas, por lo que constituye un basamento rocoso prácticamente impermeable.

#### **3.5.1.3. Acuitardo, depósitos Fluvioglaciares**

Depósitos transportados por corrientes producto de precipitaciones pluviales, compuestos por intercalación de arenas, limos arcillas y clastos sub redondeados a redondeados de diferentes tamaños. En la mayoría de los casos se observan en las zonas altas conectados a aguas superficiales, arrastrados hacia el cauce principal de la quebrada Sacclani, cuya recarga es muy influyente.

Estos sedimentos poseen cierta permeabilidad por sus constituyentes granulométricos, incrementa su permeabilidad horizontal debido a su geometría, sin embargo están clasificados como “acuitardos” debido a que no contiene agua explotable, solo presenta saturación durante las épocas húmedas.

### 3.5.2. Conductividad hidráulica de las unidades identificadas

La conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas se evaluó a través de sondeos que incluyeron aproximadamente 50 pruebas hidráulicas "In Situ". Estas pruebas fueron realizadas en dos sondeos dentro de la mina entre 2016 y 2017, conducidos por Hidroandes. Además, se utilizaron algunas pruebas hidráulicas desarrolladas en proyectos anteriores, como el proyecto "Depósito de Relaves Mishca" de BISA en 2010 y el "Proyecto Accolla Blanco" también de BISA en abril de 2011. Estos estudios permitieron determinar las propiedades hidráulicas tanto del macizo rocoso como de los suelos cuaternarios atravesados en el área de estudio.

En base a las investigaciones realizadas mediante sondeos hidrogeológicos para este propósito y estudios previos, se han establecido las propiedades hidráulicas del macizo rocoso y los suelos cuaternarios, los cuales se resumen a continuación. (Tabla. 3.3).

Unidad Hidrogeológica	Permeabilidad (cm/s)				Permeabilidad (m/d)				Clasificación
	Media Geom	Media	Max	Min	Media Geom	Media	Max	Min	
Fluvioglacial	2.30E-03	2.90E-03	1.00E-02	3.20E-05	2.00	2.50	8.90	0.03	Moderada
Pucará - Chunumayo	2.50E-03	4.30E-03	1.80E-02	2.00E-05	2.16	3.72	15.30	0.02	Alta
Grupo Mitu - Conglomerados	4.70E-05	1.20E-04	2.20E-04	1.20E-08	0.04	0.11	0.20	0.0001	Baja
Grupo Mitu - Areniscas	1.40E-04	1.50E-04	7.90E-04	1.20E-08	0.12	0.13	0.70	0.00001	Baja a moderada

Tabla 3.3 Características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Fuente, Pruebas de permeabilidad SVS. Junio 2009. y BISA Julio 2010, y BISA junio 2011)

### 3.6. MINERALIZACION

El proceso de mineralización en Catalina Huanca está estrechamente relacionado con el ciclo orogénico andino, que ha dado lugar a una mineralización polimetálica que incluye cobre, zinc, plomo y plata. El ensamble mineralógico incluye minerales de mena como galena, esfalerita, calcopirita, cobre gris, enargita y ocasionalmente marmatita. Los minerales de ganga presentes son fluorita, calcita, rodocrosita, pirita, baritina, hematita y cuarzo.

En Catalina Huanca se distinguen cuatro tipos principales de mineralización:

1. Vetas: Estas incluyen vetas como Lucero, Piedad, Rocío, Vilma y Amanda 3 Techo. Están caracterizadas por fracturas rellenadas con minerales metálicos y varían en anchura desde centímetros hasta 5 metros. Los minerales predominantes son galena argentífera, esfalerita y calcopirita a profundidad. Entre los minerales de ganga se encuentran pirita, cuarzo, fluorita, rodocrosita y carbonatos.

2. Mantos: Estos se forman en calizas, como el cuerpo estratificado de Amanda 5 en las calizas de Pucará. Están asociados con diques volcánicos dacíticos y andesíticos, y contienen minerales como esfalerita, galena y minerales de ganga como pirita, rodocrosita, rodonita, calcita, ankerita y siderita.

3. Cuerpos: Se desarrollan en calizas, subvolcánicos, areniscas y conglomerados polimícticos con intercalaciones de limolitas de la Formación Mitu, así como en el contacto entre calizas y conglomerados. Ejemplos incluyen Doña María, Doña María Piso - Marielas, Melissa, Amanda 3 Techo Oeste, Luceros, Nancy1, Gloria y Milet. La mineralogía principal está compuesta por esfalerita, galena y gangas como pirita, calcita, fluorita, rodocrosita y cristales de hematita.

También se observa una alteración propilítica retrógrada de débil a moderada en profundidad, sugiriendo la posible presencia de skarn.

4. Stockwork: Se desarrolla en el stock intrusivo riolítico y se caracteriza por un intenso fracturamiento relleno con galena, esfalerita y trazas de calcopirita. Las gangas incluyen pirita y hematita-manganeso cerca de la superficie.

Estos distintos tipos de mineralización reflejan la complejidad geológica y estructural de Catalina Huanca, influenciada por los procesos tectónicos y magmáticos asociados con el ciclo orogénico andino.

### **3.6.1. Estructuras mineralizadas**

Entre las estructuras mineralizadas más importantes debemos destacar las siguientes:

La veta Lucero se encuentra ubicada entre las cotas de 2800 a 3150 metros sobre el nivel del mar, conocida por su extensión de 950 metros. Tiene una orientación de N 85°E y un buzamiento variable de 75° a 85° NW, llegando a ser vertical en algunos puntos. Esta veta está compuesta principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, hematita, entre otros minerales. Se caracteriza por la presencia frecuente de ramaleos y sigmoides. Está presente en las formaciones geológicas de calizas Pucará y conglomerado Mitu, con espesores que varían de 0.40 a 5 metros. En Lucero se observa un descenso hacia el SW, con una mineralización más intensa en esa dirección en comparación con otras partes de la veta. Hasta diciembre de 2020, se han identificado las estructuras Lucero, Lucero 1, Lucero 2, Lucero 3, Lucero 4, Lucero 5, Lucero 6 y Lucero 7.

Veta Amanda3 Techo. Ubicado entre las cotas. 2600 – 3150 m.s.n.m., reconocida en un tramo de 700m de longitud; se emplaza en roca caliza de color gris, conglomerado y en roca arenisca, tiene leyes promedio de 0.72%Pb, 8.78 %Zn. 1.13 OzAg/t. La mineralización consiste en

esfalerita<sup>++</sup>, marmatita<sup>+</sup>, galena<sup>+</sup> pirita y está en algunos tramos acompañada con una veta de calcita de 1.20m. de ancho promedio con pobre mineralización de zinc. Se ha identificado a diciembre 2020 las estructuras Amanda3 Techo y Amanda3 Techo1.

Cuerpo Nancy. Es un cuerpo de reemplazamiento encontrado en conglomerados polimícticos calcáreos y silíceos del Mitu y en Calizas del Pucará (Nv. 3090), conocidos como Chumbilla - Nancy. Su mineralogía incluye principalmente galena, esfalerita y calcopirita, acompañados por pirita, calcita, fluorita, rodocrosita, y ojos de especularita-hematita. Se observa una alteración propilítica "retrógrada" de leve a moderada. Estos cuerpos se encuentran en proximidad y en contacto con las calizas Pucará, y su mineralización está asociada a fallas como la veta Principal, Lucero, entre otras. Tienen un rumbo predominante de NS a N15° W y un buzamiento de 23° a 35° hacia el W - SW.

En la superficie, los afloramientos muestran la presencia abundante de psilomelano y limonitas. Se ha reconocido su presencia tanto en el interior de la mina como en afloramientos, con una extensión de más de 550 metros y anchos mineralizados que alcanzan hasta 46 metros. Los conglomerados calcáreos reemplazados en niveles superiores al nivel 3446 muestran una leve alteración propilítica.

Cuerpos Doña María. Ubicados entre las cotas de 2850 a 2950 metros sobre el nivel del mar, estos cuerpos presentan mineralización subhorizontal en el conglomerado Mitu, con una ley promedio de zinc del 4.6%. Según el Dr. Murray Hitzman, la mineralización reemplaza clastos calcáreos y muestra una mineralogía que incluye facies de anfíboles y piroxenos, junto con feldespatos y hematita retrógrada, sugiriendo la presencia de un posible Skarn.

Cuerpos Doña María Piso. Ubicados entre las cotas de 2750 a 2850 metros sobre el nivel del mar, estos cuerpos se presentan en paquetes subhorizontales dentro del conglomerado. La presencia de clastos y matriz calcárea en el conglomerado, junto con la cercanía en algunos casos a un subvolcánico andesítico, ha favorecido el emplazamiento de sulfuros. Tienen un promedio de zinc del 4.6%, aunque se han identificado zonas con leyes mayores. Hasta diciembre de 2020, se han identificado las estructuras Doña María Piso, Doña María Piso 1, Doña María Piso 2, Doña María Piso 3, Doña María Piso 4, Doña María Piso 5 y Doña María Piso 6.

Cuerpos Marielas. Ubicados entre las cotas de 2950 a 3050 metros sobre el nivel del mar, estos cuerpos muestran mineralización de esfalerita (ZnS), marmatita (Zn, Fe)S y galena (PbS), con una ley promedio de plomo del 2.6% y zinc del 9.7%, con cierta presencia de oro. Se encuentran en el contacto entre caliza y conglomerado, influenciados por los feeders de Amanda 3 Techo, veta Luceros y Ramales, con buzamiento de bajo ángulo entre 45° y subhorizontales. Hasta diciembre de 2020, se han identificado los cuerpos Mariela, Mariela 1, Mariela 2, Mariela 3, Mariela 4, Mariela 5, Mariela 6, Mariela 7 y Mariela 8.

Cuerpos Melissa. Ubicado entre las cotas de 2600 a 2800 metros sobre el nivel del mar, este cuerpo está emplazado en areniscas con bandeamiento de limolitas y roca subvolcánica, cercano al conglomerado. El mineral principal es la marmatita (Zn, Fe)S, con una ley promedio de zinc del 13.5%. La alteración presente incluye cloritización, argilización y hematización de intensidad leve a moderada, con espesores que varían de 3 a 40 metros. Hasta diciembre de 2022, se han identificado las estructuras Melissa, Melissa 1, Melissa 2 y Melissa 3.

Cuerpo Gloria. Ubicado entre las cotas 2,300 – 2,690 m.s.n.m., con una inclinación promedio de 40 grados, el mineral se encuentra emplazado en una arenisca con tramos de limoarcillitas y caliza recristalizada; presenta potencias variables que van desde los 5.00 hasta los

15.00m. con presencia de mineralización mayormente de zinc (marmatita) y disseminaciones de pirita cubica, magnetita y hematita. Se ha identificado a diciembre 2020 las estructuras Gloria, Gloria 1 y Gloria 2.

Cuerpo Silvia. Ubicado cerca a la cota 2,850 m.s.n.m. con inclinación subhorizontal que van de 5 a 15 grados. El mineral se encuentra emplazado en contacto de subvolcánico y conglomerado con potencia promedio de 6m. y con mineralización principalmente de zinc (marmatita) y como ganga pirita y specularita; tiene leyes promedio de 1.37 % Pb y 9.36%Zn. A diciembre 2020 se tiene las estructuras Silvia, Silvia 3, Silvia 4, Silvia 5 y Silvia 6.

Cuerpo Milett. El cuerpo Milett, identificado en el Nv. 3050 se emplaza principalmente en roca subvolcánica andesítica y en contacto con el conglomerado polimíctico y caliza. El mineral de mena es la esfalerita (ZnS), marmatita (Zn,Fe)S y galena (PbS) tiene leyes promedio desde 5.00 a 12.00 % Zn y 0.50 a 3.00 % Pb, la alteración que presenta es la de cloritización, argilización con tendencia de débil a fuerte.

Tipo Stock Work, Keyko. Es una estructura de importancia secundaria. Keyko se presenta como una estructura brechoide irregular de reemplazamiento, formada por un entramado de vetilleo con diversas direcciones que atraviesan el Stock Subvolcánico riolítico, con un rumbo promedio de N24°E y un buzamiento de 30°NE. La estructura muestra anchos mineralizados que van desde 0.20 hasta 12.00 metros, compuestos principalmente por galena, esfalerita y minerales de plata (Platas rojas), acompañados de pirita disseminada y en venillas, hematita y rodocrosita.



## **CAPÍTULO IV : METODOLOGIA E INVESTIGACIONES GEOTECNICAS COMPLEMENTARIAS**

Para las etapas iniciales de las nuevas zonas de avances se procura conocer las características físicas y geomecánicas de las rocas encajonantes como de las estructuras mineralizadas, para ello se utilizan diversas técnicas de recopilación de información que nos permiten comprender el comportamiento y respuesta del macizo con respecto al desarrollo de laboreos. Los macizos rocosos pueden ser heterogéneos y muy complejos, por lo que describir y definir sus propiedades requiere una serie de análisis y ensayos geomecánicos.

### **4.1. LOGUEO GEOTECNICO DE SONDAJES DIAMANTINOS**

Durante la exploración y explotación de un yacimiento mineral se llevan a cabo perforaciones diamantinas, estas contienen información crucial sobre la geología, pero también son utilizadas para registrar un logueo geotécnico acorde con la características y propiedades físicas y geotécnicas del macizo rocoso.

Es recomendable que la descripción geomecánica de los sondajes de perforación, se realicen inmediatamente después de ser extraídos ya que posterior a esto muchas características geomecánicas podrían perderse, sea por la manipulación de sondajes, almacenamiento mal organizado o mal hecho, el mismo muestreo geológico, entre otros. Lo cual nos permite obtener información de zonas donde es imposible acceder a una cara libre del macizo rocoso como en las labores subterráneas.

El logueo geotécnico permite obtener información geotécnica, es decir información que corresponda a las características del macizo rocoso a partir de cores (sondajes de perforación), ya sean infill, exploratorios, o en el mejor de los casos sondajes direccionados. La base de datos que

se consigue a partir del logueo geotécnico se utiliza básicamente para realizar la caracterización y posterior clasificación del macizo rocoso mediante los sistemas del índice Q de Barton y la valorización RMR<sub>89</sub> de Bieniawski.

En primera instancia se registran datos generales como las coordenadas del collar y orientación de la perforación diamantina. Seguidamente se registran las características en cada corrida o tramo de perforación: número de fracturas del tramo, RQD, resistencia (a carga puntual), recuperación, relleno, rugosidad, alteraciones, presencia de agua subterránea y otras observaciones que se consideren convenientes. El formato de logueo usado se adjunta como anexo A.

#### **4.1.1. Índice Q de Barton**

Obtenido también en el proceso de logueo ya que es una de las clasificaciones geomecánicas más populares junto con el RMR<sub>89</sub> de Bieniawski. La clasificación del índice Q de Barton se emplea mayormente en la evaluación del tipo de sostenimiento en labores subterráneas y se calcula mediante seis parámetros geotécnicos en la siguiente expresión

$$Q = (RQD/J_n) \cdot (J_r/J_a) \cdot (J_w/SRF)$$

Donde, (RQD/J<sub>n</sub>) representa el tamaño de bloques; (J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub>) representa la resistencia al corte entre bloques y (J<sub>w</sub>/SRF) representa la influencia del estado tensional (Barton, 1974). Se observa como parte del logueo en la penúltima columna del anexo A y anexo B.

#### **4.2. ENSAYOS DE LABORATORIO**

Las dimensiones de las muestras, su elaboración para usarlas en los ensayos de las propiedades mecánicas de rocas y el número de ensayos son aspectos relevantes que deben considerarse cuando se toman muestras en el campo puesto que las muestras, ya sea de la roca encajonante o de las zonas mineralizadas, serán sometidas a análisis de laboratorio.

Los datos de los ensayos contemplados corresponden al estudio realizado por la consultora DCR Ingenieros en el año 2019 para Catalina Huanca, para lo cual se tomaron resultados de muestras de las zonas en la que actualmente se viene desarrollando las operaciones de la mina.

Como propiedades mecánicas de la roca intacta se tiene: propiedades físicas, resistencia a la compresión simple, ensayos de carga puntual y otros ensayos complementarios. Con estos ensayos también se obtienen datos de las propiedades físicas de la roca como son densidad, peso unitario, humedad, porosidad, absorción, entre otros; están en su totalidad estandarizadas por las normas emitidas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) o por aquellas propuestas por la ISRM.

#### **4.2.1. Propiedades Físicas**

En Catalina Huanca se tienen una gran variabilidad de calidades de macizo rocoso. Por ello es importante comprender cual será la reacción de la roca intacta ante los esfuerzos, si es rígida y de alta resistencia puede ocasionar un estallido de roca, por el contrario, si es altamente deformable podría traducirse en un comportamiento elastoplástico con altas deformaciones que con el tiempo pueden “cerrar” las excavaciones subterráneas. El objetivo principal de este tipo de ensayos es establecer las propiedades físicas de la roca, y como principal dato las densidades de las rocas existentes en la zona de estudio, así como la porosidad aparente, absorción, etc. (ANEXO D).

#### **4.2.2. Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple (Uniaxial)**

Se tomaron muestras representativas de los testigos de perforación, las mismas fueron tomadas de distintos tipos de litologías como son areniscas, conglomerados, calizas y rocas mineralizadas; para poder determinar la resistencia a la compresión simple de cada una de ellas ( $\sigma_{ci}$ ).

El ensayo de compresión simple tiene como objetivo determinar la resistencia máxima a la compresión uniaxial en una muestra en forma cilíndrica (muestra de core), la cual es sometida a una carga axial sin confinamiento hasta que la muestra falle. Entonces cuando se produzca la falla, el esfuerzo normal vertical sobre la muestra, se reconoce como la resistencia a la compresión simple. (ANEXO D).

#### **4.2.3. Ensayo de carga puntual**

Este ensayo sirve para estimar la resistencia a la compresión simple de una manera indirecta, los ensayos realizados por la consultora se realizaron en testigos de perforación que tienen forma regular. De igual manera se tomaron en cuenta distintos tipos de litologías para la realización de las pruebas por parte de DCR Ingenieros. Para determinar la resistencia a la compresión simple (UCS), se debe determinar el diámetro equivalente ( $D_e$ ) según el tipo de ensayo ejecutado diametral, axial o irregular. Después se debe determinar el valor de  $I$ , a partir de la división del valor de carga de ruptura ( $P$ ) y el diámetro equivalente ( $D_e$ ). En tercer lugar, se debe determinar el valor  $I(50)$  que es el resultado de la corrección para obtener un valor único de resistencia.

Como último paso, para determinar el valor de la resistencia a la compresión simple es necesario contar con el factor de conversión  $K$  y multiplicarlo por  $I(50)$ . (ANEXO D).

#### **4.2.4. Ensayo de Martillo Schmidt o con esclerómetro**

El propósito es aproximar el valor de la resistencia a la compresión simple mediante una correlación entre el número de rebotes, dirección en donde se aplica la carga y la densidad de la muestra. Aplicable tanto a las discontinuidades como para la roca intacta.

Las densidades fueron tomadas del estudio que la consultora realizó para Catalina Huanca, en donde existe una mínima variación de las densidades en las litologías estudiadas, las calizas,

conglomerados y areniscas; por el contrario, se encontró mayor variación en las muestras mineralizadas.

Se realizaron ensayos con el esclerómetro tanto en el proceso de logeo como en los mapeos geomecánicos, se hizo de manera perpendicular con respecto a la superficie de los testigos respetando la relación que la longitud de los testigos es el doble que su diámetro, y se realizaron las pruebas en testigos tipo HQ para mayor confiabilidad. En el proceso del mapeo geomecánico de interior mina, se realizó las pruebas en los cuerpos de Mariela 4, Doña Maria Piso y Melissa, y se ejecutaron tanto en las paredes de la roca como en las discontinuidades.

#### **4.3. MAPEO GEOMECANICO SUBTERRANEO CON EL METODO DE CELDAS**

Otro trabajo continuo que se realiza mientras avanza las labores subterráneas es el mapeo geomecánico como recolección sistemática de información, el método más común es el de “mapeo geomecánico por celdas”. (ANEXO C)

El “mapeo geomecánico por celdas” se desarrolla en una ventana estructural, la cual se procure abarque un área aproximada de  $9\text{m}^2$  ( $3 \times 3\text{m}$ ), en una cara libre del macizo rocoso, por medio del mapeo geomecánico se identifican y cuantifican las características geomecánicas y de las principales familias de fracturas. Para cada familia reconocida se establece el tipo de fractura a la que corresponde, su orientación (rumbo y buzamiento) y la resistencia de la pared de la fractura, apertura, persistencia, rugosidad, relleno, espaciamiento, y grado de meteorización. Todos estos datos son usados para poder clasificar al macizo rocoso mediante el sistema RMR (Rock Mass Rating), GSI (Índice de Resistencia Geológica) y en el Sistema Q de Barton con parámetros como RQD,  $I_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$ ,  $J_w$ .



En esta etapa se registra los datos recopilados anteriormente como el collar, la valoración geomecánica y datos survey, con el fin de verificar el correcto levantamiento de las muestras.

El software de StudioRM Datamine, al momento de generar la data de sondajes en 3D, genera también un archivo extra donde se registran todos los errores o inconsistencias que se pudieron encontrar en los archivos collar, survey y geomecánica, este archivo sirve como base para corregir la data, se continua con este proceso hasta que dicho archivo de errores no reporte ninguno. (Ver fig. 5.1).

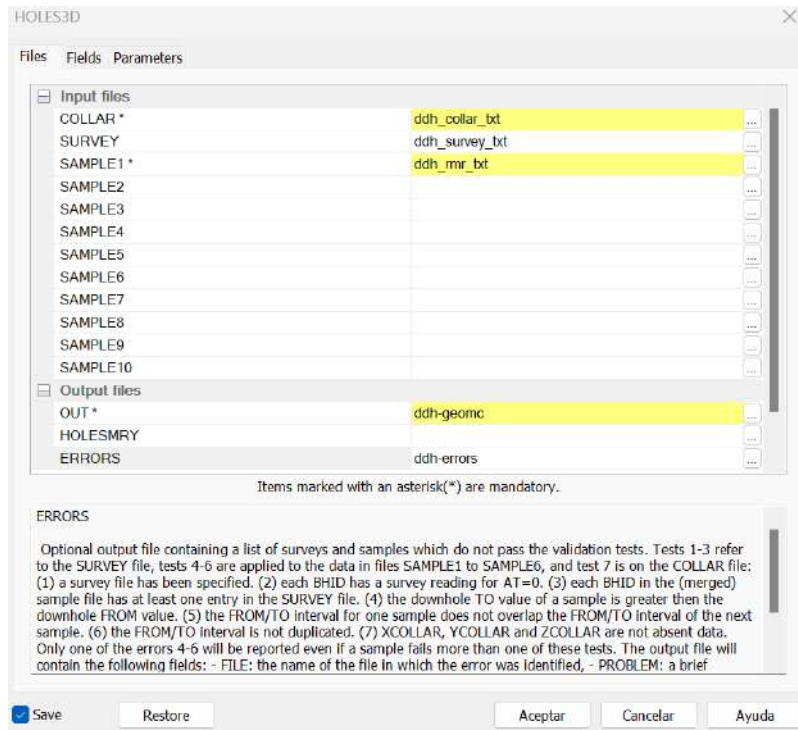


Figura 5.1 Generación de sondajes en 3D, tomando como base archivos de collar, survey y geomecánica (RMR) (Fuente: Propia)

Los archivos susceptibles a modificación son la tabla survey y datos geomecánicos, regularmente los datos de la tabla collar no suele corregirse, a no ser que se validen con otra medición topográfica de por medio, ya que es un dato que no varía a excepción de un replanteo topográfico. (Ver fig. 5.2).

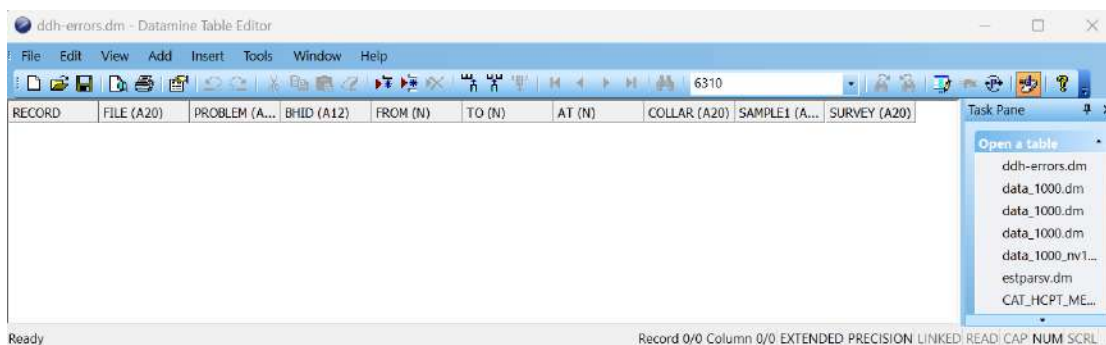


Figura 5.2 Archivo “.rm” que reporta errores en la data de sondajes (no figura ninguno, por lo que se valida que la data está correctamente ingresada). (Fuente: Propia)

### 5.1.2. Análisis exploratorio de datos (AED)

Mercado (2017) define al AED como “el proceso de utilizar resúmenes numéricos y visualizaciones para explorar sus datos e identificar posibles relaciones entre variables se denomina análisis exploratorio de datos” (AED por sus siglas).

Es un proceso de análisis en el que se usan estadísticas de resumen y gráficos para poder conocer los datos e identificar la distribución de sus valores, en esta etapa aun no influye la ubicación espacial de los datos estudiados.

Con el AED, se logran identificar anomalías en la base de datos, como por ejemplo valores atípicos, también se pueden reconocer patrones y comprender probables correlaciones entre las variables.

#### 5.1.2.1. Análisis estadístico de datos

Para iniciar el AED, se hace un análisis estadístico que es netamente de valores y la distribución de estos. Así, el análisis estadístico se ve orientado a la extracción de conclusiones y a la toma de decisiones.



En el presente trabajo se analizan datos desde el tamaño de muestra hasta medidas de posición como los percentiles, ya que estos nos ayudaran a determinar los parámetros que se deben tomar en la estimación, estos métodos se detallan más adelante. (Tabla 5.2).

Structure	Variable	#Samples	Minimum	Maximum	Mean	Variance	StandDev	CoefVar	Per25	Per50	Per75	Per95
Melissa	RMR_aren	7705	4	69	43.168	80.889	8.994	0.208	36.8	44	50	55
	RMR_clz	1453	17	69	50.358	83.966	9.163	0.182	45.4	52.2	56	64
Doña Maria Piso	RMR_cngl	26739	12	74	40.807	140.875	11.869	0.291	31	41	51	60
Mariela 4	RMR_cngl	7692	12	70	34.131	129.897	11.3997	0.334	26	32	43	54
	RMR_clz	4484	12	67	32.132	150.183	12.255	0.381	22	31	41	54

Tabla 5.2 Datos de ensayo sin procesar, Mina Catalina Huanca (Fuente: Propia)

### 5.1.3. Validación de datos

#### 5.1.3.1. Composición

Como parte del proceso se realiza la estadística en el campo de longitud (LENGTH), para determinar la distribución de la información y así establecer la longitud más idónea de composición.

Para poder establecer la longitud de composición, se observa en el histograma una moda o mayor frecuencia en el rango de 0.8 – 1.1, considerando que el tamaño de celda para el modelo de bloques sería de 4x4x4m debido al tamaño establecido por las operaciones mineras, se toma la decisión de compositar a 1.0m, de este modo se concluye que con 4 tramos compositados se podría completar un bloque del modelo tridimensional, esta longitud fue seleccionada para mantener la distribución de  $RMR_{86}$  lo más cercana posible a la data original para un posterior (Ver fig. 5.3).

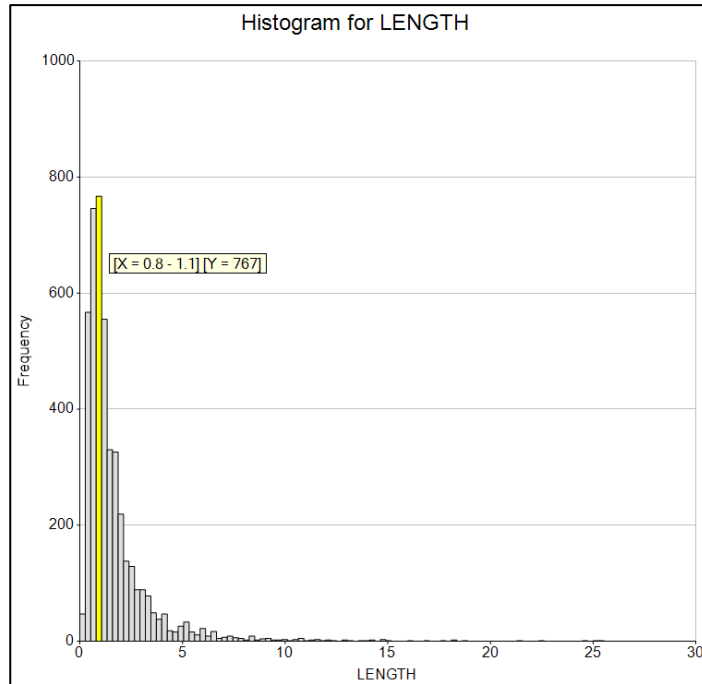


Figura 5.3 Histograma de sondajes geomecánicos sin compositar donde se observa que la moda es de 1.0 m. (Fuente: Propia)

Se composita los sondajes geomecánicos con contactos duros delimitados por la litología y longitud de compósito igual a 1.0, longitud mínima de compósito igual a 0.5. (Ver fig. 5.4).

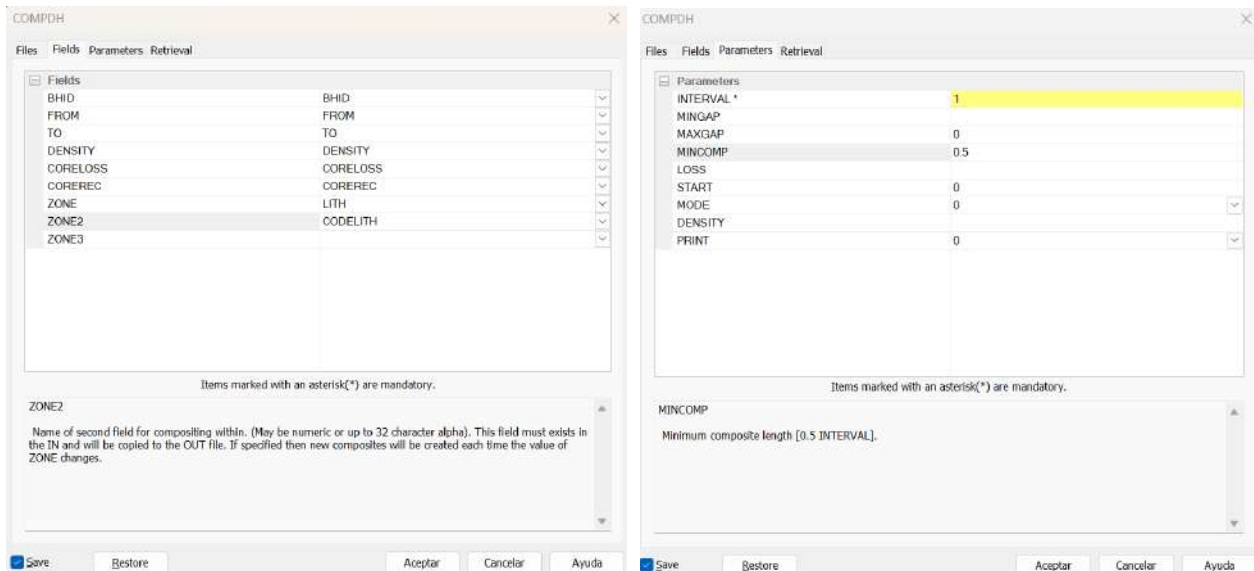


Figura 5.4 Parámetros de composición (Fuente: Propia)

Finalmente se muestra los taladros después de la compositación (ver figura 6.5), los tramos que son menores al metro de compositación corresponde a muestras que se encuentran en los bordes de los contactos litológicos o en los bordes de sondajes. (Ver fig. 5.5).

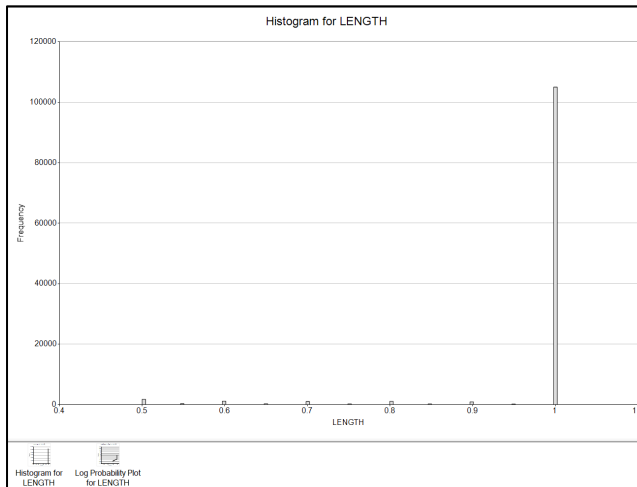


Figura 2.5 Histograma de los sondajes geomecánicos luego de la compositación, longitud de composito igual a 1.0, longitud mínima de composito igual a 0.5. (Fuente: Propia)

### 5.1.3.2. Tratamiento de valores extremos

Los datos compositados se analizaron para determinar el impacto de los valores atípicos de alto grado en las poblaciones totales muestreadas. Este proceso se llevó a cabo utilizando gráficos de probabilidad logarítmica para definir poblaciones atípicas que podrían afectar la estimación de los valores RMR.

La gráfica de probabilidad puede ser suave cuando hay correlación entre la muestra y su entorno. Una desviación marcada de esta curva generalmente sirve para definir una población de muestras que da un salto significativo en la calificación en comparación muestras de la población cercana. Esto podría representar una pequeña población de valores atípicos, o algún error analítico o humano o incluso una población de alto grado que necesitaría modelarse de manera diferente. En primera instancia se debe definir el área de influencia sobre la cual se va a generar nuestro modelo de

bloques con los datos geomecánicos. En el presente estudio se usó como base los sólidos de cada cuerpo mineralizado, generados por el área de geología, dándoles un radio de influencia de 30m en los 3 ejes, como estándar para conocer la calidad de la roca encajonante que lo envuelve y no solo de la zona mineralizada.

Con esto se obtiene el sólido que corresponde al área del modelo geomecánico, la data que se analizara de aquí en adelante corresponde a la que se encuentra dentro de dicha envolvente. (Ver fig. 5.6).

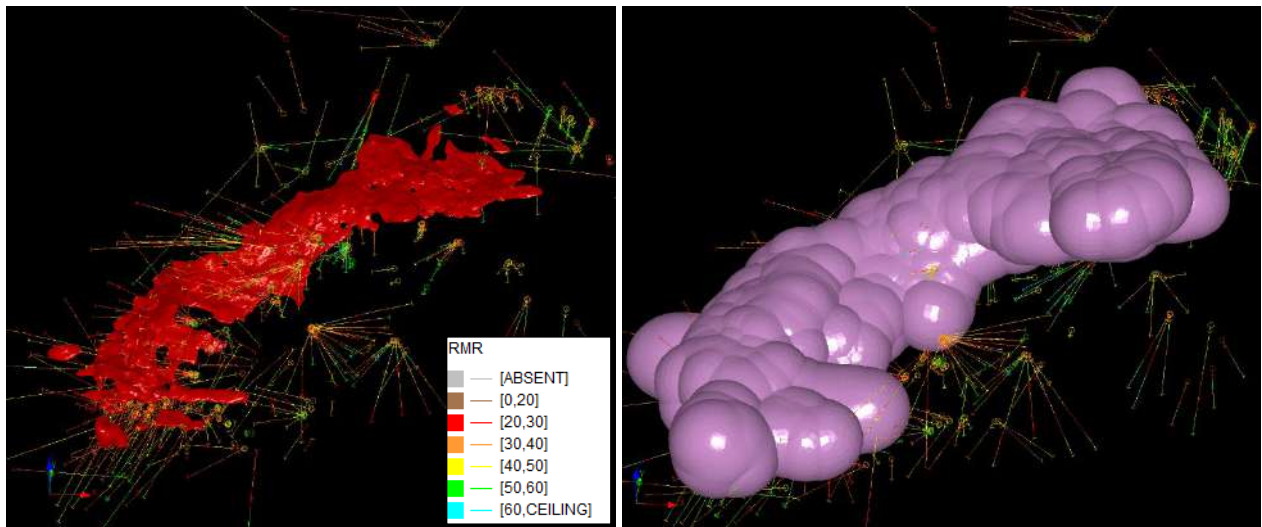


Figura 5.6 a) Sólido del cuerpo Melissa (proporcionado por el área de geología) b) extensión del sólido en 30m, para analizar la roca encajonante. Sondajes con valores RMR aparecen en ambas imágenes. (Fuente: Propia)

Según el libro Applied Predictive Modeling (2013) “los valores extremos son muestras en nuestro set de datos que se encuentran excepcionalmente alejadas de la mayor parte de los datos.” Actualmente se tiene dos nociones que podrían explicar la aparición de valores atípicos o extremos en una base de datos: se debería a los errores en la toma de datos o podría ser que realmente el dato observado sea un valor extremo.

Para la detección de estos valores se usó el método del rango inter-cuartiles; este método se utiliza cuando los datos no tienen una distribución normal, donde nos interesa tener en cuenta sólo algunos percentiles:

- El percentil 75, que es el valor para el cual el 75% de los datos se encuentra por debajo de dicho valor
- El percentil 90, que valor para el cual el 10% de los datos se encuentra por encima de dicho valor
- El percentil 95, que es el valor para el cual el 5% de los datos se encuentra por encima de dicho valor

Gráficamente se puede visualizar los cuartiles y a modo de límites o barreras usando el gráfico “Probability plot” o también el histograma. Se recomienda hacer el corte por encima del percentil 90 o 95, ya que esta área se encuentran los valores más altos que tienen mayor probabilidad de ser atípicos, la primera inflexión cóncava por encima de estos marcaría el valor extremo donde termina la correlación entre las muestras. Este análisis se realiza para cada tipo de litología por separado, debido a que no todos los tipos de rocas responden de igual manera ante un determinado esfuerzo, por ejemplo, una falla. En rocas con mayor dureza las fallas se evidencian como planos con espejos de falla normalmente sin panizo, mientras que en rocas con menos dureza aparece una zona de influencia de falla, con estrías, espejos de falla y la ocurrencia de panizo o gouge. (Ver fig. 5.6 hasta 5.13). (Tabla 5.3.).

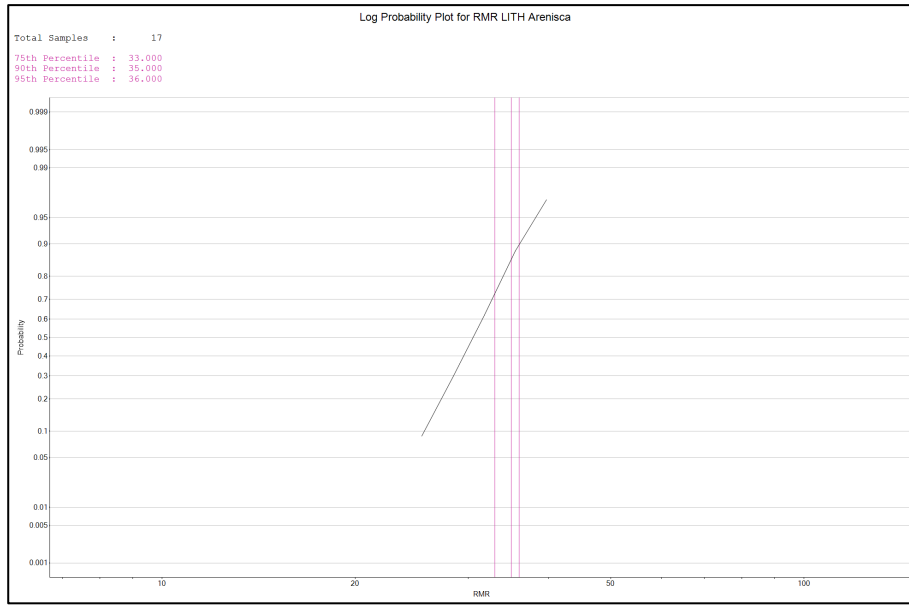


Figura 5.7 Definición del valor de corte en Arenisca para Mariela 4, como tiene muy poca densidad de muestras y todas tienen valores similares (comportamiento lineal), no se aplica un corte. (Fuente: Propia)

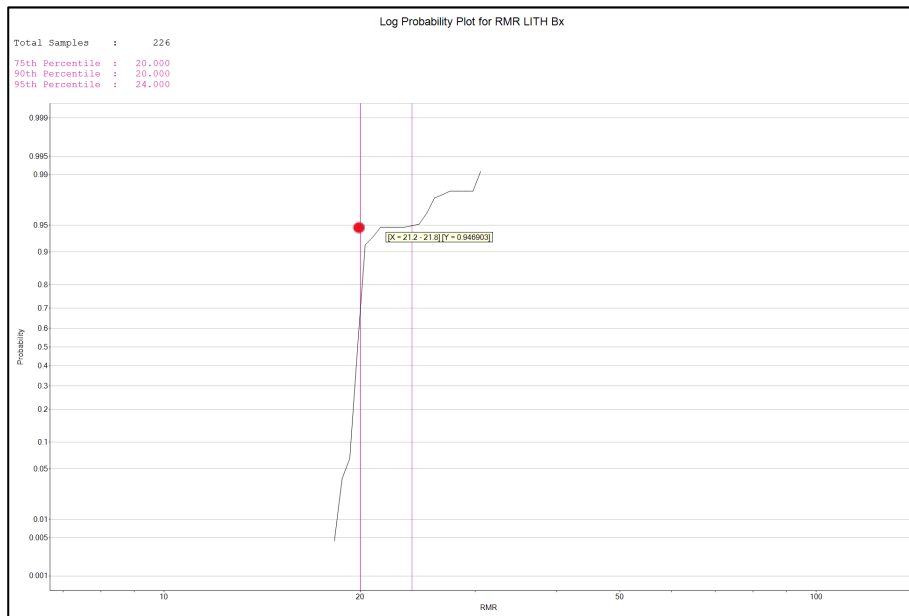


Figura 5.8 Definición del valor de corte en Brecha para Mariela 4,  $X=21.80$  (Fuente: Propia)

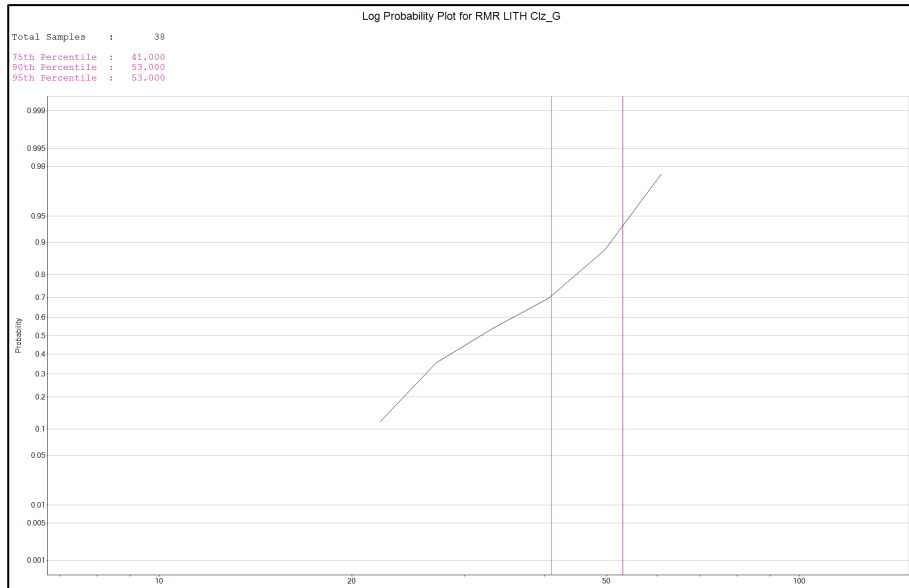


Figura 5.9 Definición del valor de corte en Caliza para Mariela 4, como tiene muy poca densidad de muestras y todas tienen valores similares (comportamiento lineal), no se aplica un corte. (Fuente: Propia)

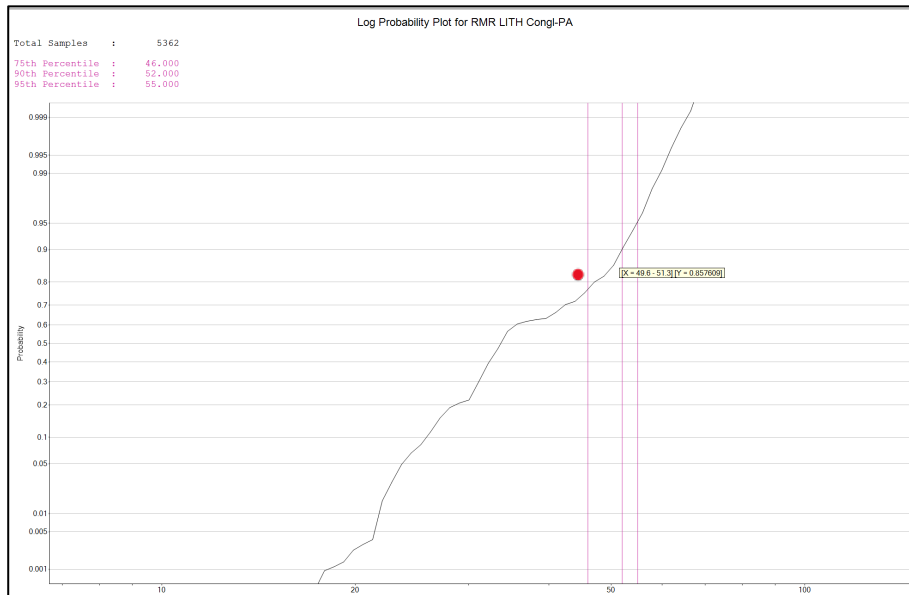


Figura 5.10 Definición del valor de corte en Conglomerado polimictico para Mariela 4, X=51.30 (Fuente: Propia)

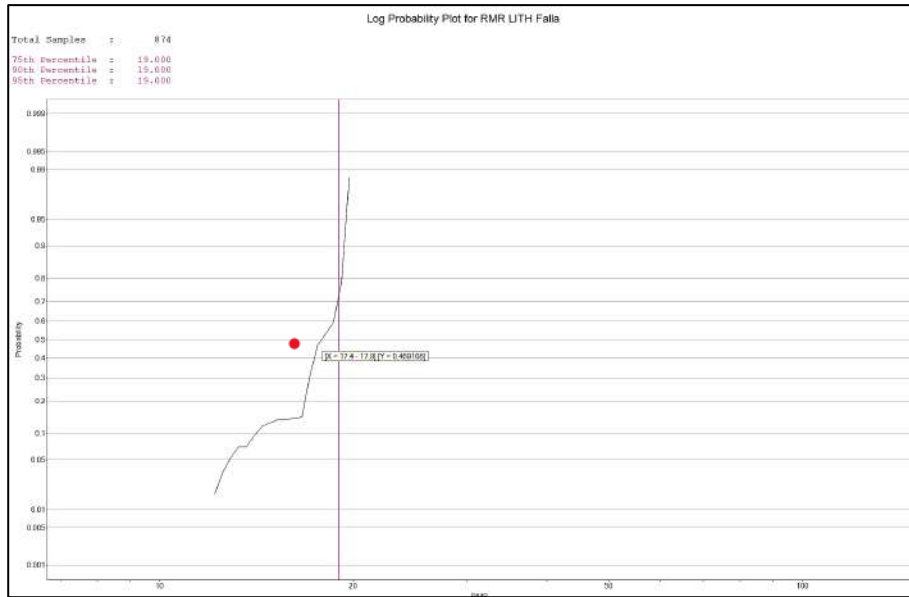


Figura 5.11 Definición del valor de corte en Fallas para Mariela 4,  $X=17.90$  (Fuente: Propia)

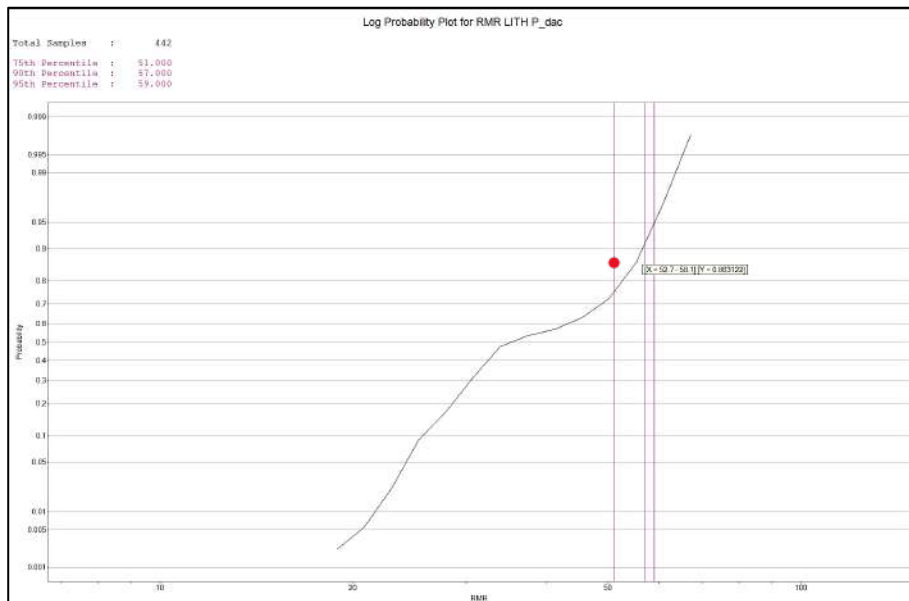


Figura 5.12 Definición del valor de corte en Porfido para Mariela 4,  $X=58.10$  (Fuente: Propia)



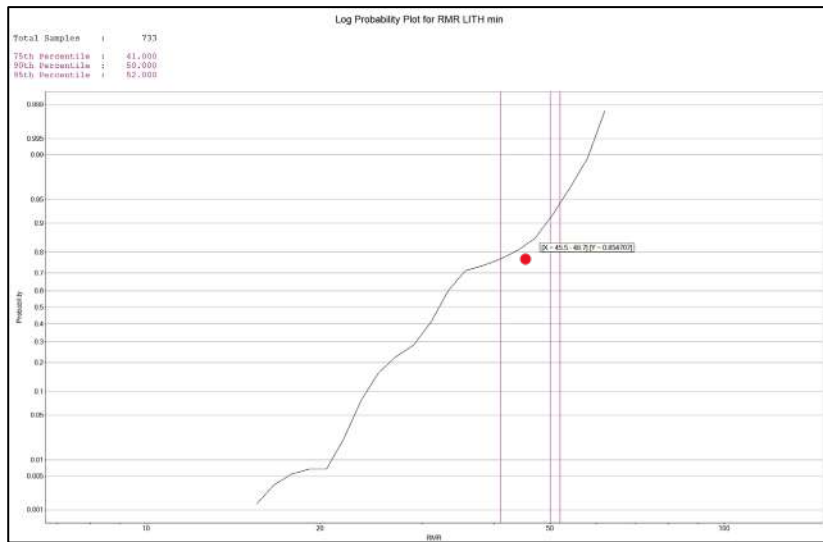


Figura 5.13 Definición del valor de corte en Estructura mineralizada para Mariela 4,  $X=48.70$  (Fuente: Propia)

Estructura	Dominio	Variable	# Samples	RMR	
Melissa	Conglomerado	Arenisca	23	-	
		Caliza	0	-	
		Conglomerado	1352	59	
		Brecha	2	-	
		Fallas	5	-	
		Porfido	2	-	
	Arenisca	Estructura mineralizada	69	56	
		Arenisca	5981	55	
		Caliza	65	58	
		Conglomerado	8	-	
		Brecha	6	-	
Doña Maria Piso	Conglomerado	Fallas	103	19	
		Porfido	149	59	
		Estructura mineralizada	1493	54	
		Arenisca	804	56	
		Caliza	12	-	
		Conglomerado	21676	59.5	
	Mariela 4	Conglomerado	Brecha	170	24.6
			Fallas	743	19
			Porfido	52	54
			Estructura mineralizada	3282	59
			Arenisca	17	-
Caliza			38	-	
Caliza		Conglomerado	5362	51.3	
		Brecha	226	21.8	
		Fallas	874	17.9	
		Porfido	442	58.1	
		Estructura mineralizada	733	48.7	
	Arenisca	1	-		
	Caliza	2621	48.3		
	Conglomerado	49	37.9		
	Brecha	162	31.9		
Fallas	838	16			
Porfido	360	47.1			
Estructura mineralizada	453	39.2			

Tabla 5.3 Top-cut de todos los dominios. (Fuente: Propia)

#### 5.1.4. Análisis del variograma

Con la ayuda de los variogramas es posible definir los parámetros variográficos, tomando como base las características geomecánicas, tales como la resistencia a la carga puntual de la matriz rocosa (MPa), valorización RQD, estado de las discontinuidades, separación entre diaclasas, presencia de agua, etc; en el área de estudio se obtuvieron calidades de macizo rocoso que van desde muy buena hasta mala con un grado de confianza de 90 a 95%.

Para determinar los parámetros variográficos en tres dimensiones, se analiza por separado cada sub-dominio geológico-geomecánico, siguiendo el procedimiento detallado a continuación.

- Separación por sub-zonas de acuerdo con el dominio geológico
- Cálculo del variograma omnidireccional, es decir, los variogramas experimentales en todas las direcciones.
- Selección del variograma más adecuado, que representa la zona o dominio seleccionado.
- Análisis de los nuevos variogramas experimentales ortogonales al eje seleccionado en el paso anterior.

La variabilidad del RMR<sub>89</sub> llega a ser amplia en cortas distancias, por lo que nuestra evaluación se hizo cada 4.0m, lo cual se refleja en el tamaño de celda del modelo de bloques, que está en función al dimensionamiento estándar de las labores subterráneas. Con el fin de representar esta variabilidad se le designa a cada bloque características y valores únicos.

Una de las principales propiedades en el presente contexto es la existencia de una gran variabilidad local, por lo que se delimita los parámetros geomecánicos espacialmente mediante del

modelamiento bajo sub-dominios con restricción bien demarcadas, como es la litología, de tal manera que represente la anisotropía, continuidad y variabilidad del RMR<sub>89</sub>.

El Cuerpo Mariela 4 se encuentra emplazado en el contacto caliza-conglomerado, sirviendo este también como control en su mineralización, por lo que se divide a la zona de estudio en dos zonas, una que corresponde al área de la caliza y otra que corresponde a la zona del conglomerado. (Ver fig. 5.14).

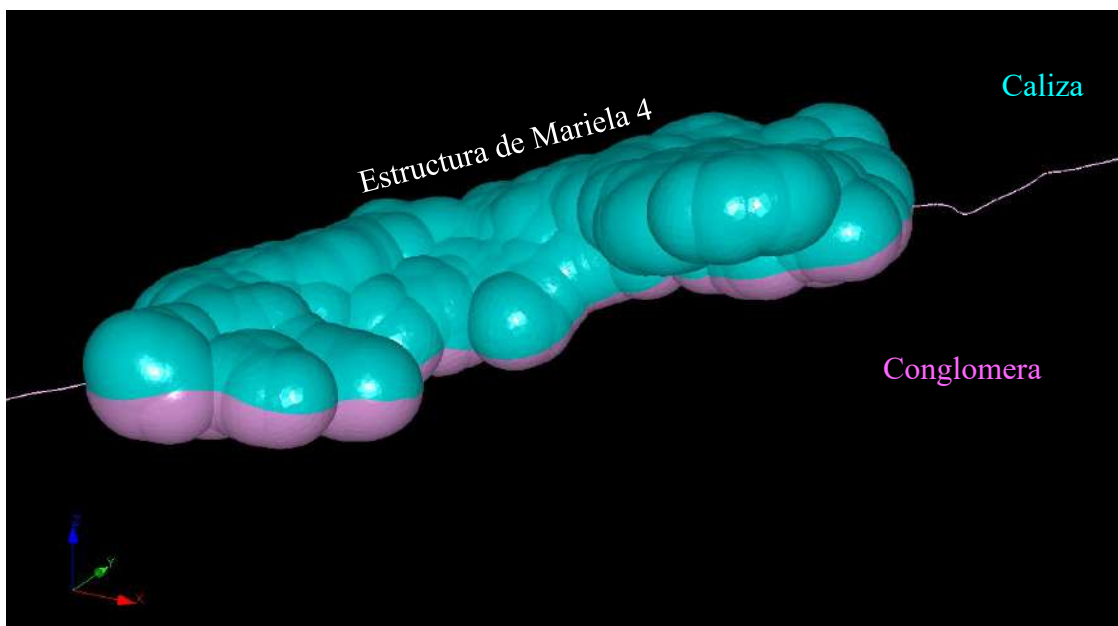


Figura 5.14 División de dominios según control litológico. (Fuente: Propia)

#### 5.1.4.1. Variografía

A partir de la información compositada, los valores extremos analizados, y la delimitación de las zonas o sub-dominios, se realizó un breve estudio variográfico. Para ello se utilizó la herramienta de estimación multivariable, donde se creó un grupo de variogramas en los rumbos y buzamientos más representativos. (Ver figura 5.15, 5.16).

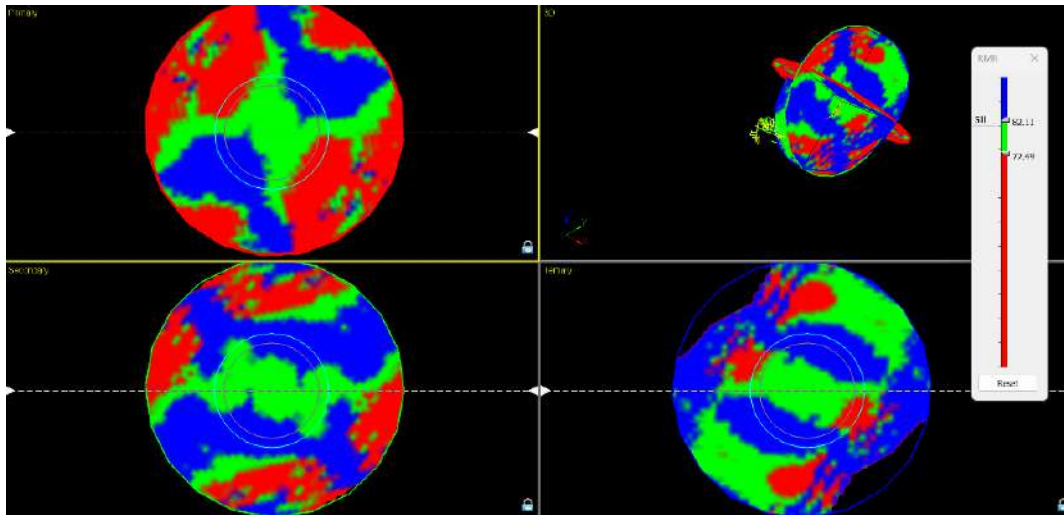


Figura 5.15 Generación del plano de rotación en los 3 ejes (Fuente: Propia)

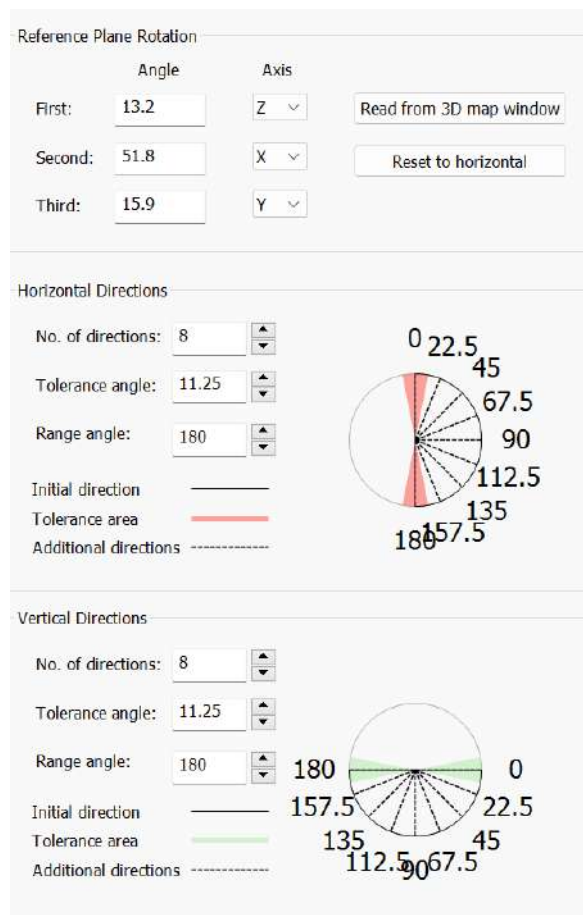


Figura 5.16 Generación de variogramas con referencia al plano de rotación (Fuente: Propia)

Primero se gradúa el variograma omnidireccional, en este se fija lo que es la meseta o sill, el efecto pepita u origen y los nodos. Como se ve en la siguiente figura 5.17.

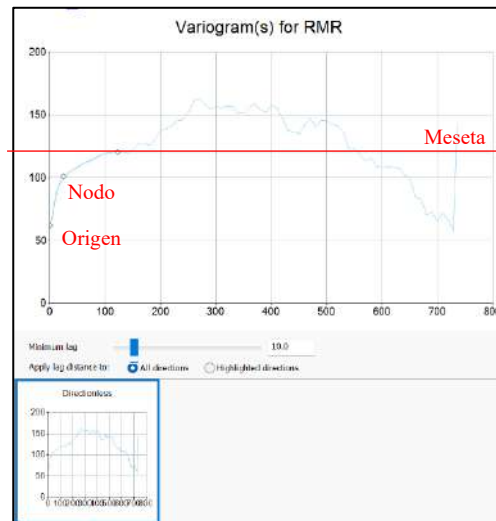


Figura 5.17 Variograma omnidireccional, con el ajuste de la meseta, origen y nodos en la estructura de Mariela 4, dominio conglomerado. (Fuente: Propia)

En base a la generación del variograma omnidireccional se desarrolló posteriormente el análisis unitario por cada variograma generado, para encontrar la tendencia principal (ver figura 6.18) en esta fase también se determinan los alcances para medir la certidumbre de la estimación, y como último paso se realizó el modelamiento variográfico de carácter anisotrópico. (Ver fig. 5.18).

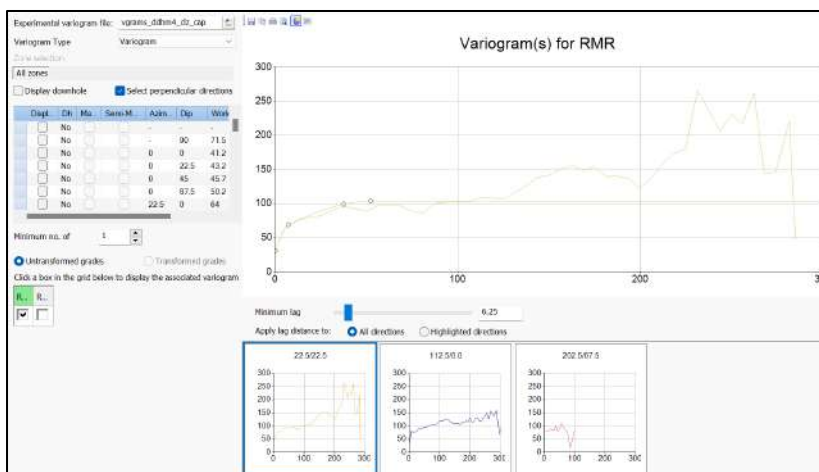


Figura 5.18 Análisis unitario de variogramas (Fuente: Propia)

### 5.1.4.2. Modelo variográfico

El análisis correlacional que se observa en la Figura 6.19. expone la distribución de las muestras estudiadas, teniendo en el eje de las abscisas, las distancias, y en el eje de las ordenadas, la variabilidad de los datos ingresados, tomando como referencia estos datos podemos observar los alcances del RMR<sub>89</sub>. (Ver fig. 5.19).

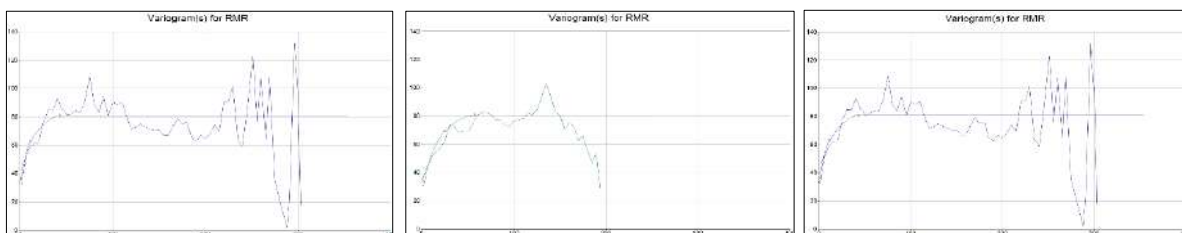


Figura 5.19 Modelo del variograma de valores RMR, estructura Mariela 4. (Fuente: Propia)

Se han generado las variografías para cada estructura con la envolvente extendida. La Tabla 5.4, muestran los variogramas modelo para todas las estructuras.

Structure	Dominio	Variogramas					
		AZ_1	BZ_1	AZ_2	BZ_2	AZ_3	BZ_3
Melissa	Arenisca	67.5	0	157.5	67.5	337.5	22.5
	Conglomerado	0	90	45	0	135	0
Doña María Piso	Conglomerado	0	22.5	90	0	180	67.5
Mariela 4	Conglomerado	337.5	22.5	67.5	0	157.5	67.5
	Caliza	292.5	22.5	22.5	0	112.5	67.5

Tabla 5.4 Resumen de los variograma y sus ortogonales para todas las estructuras de mina Catalina Huanca. (Fuente: Propia)

Se estimó los valores RMR utilizando el método kriging ordinario para todas las envolventes, debido a la disponibilidad de controles geológicos y al buen espaciamiento de las muestras de sondajes.

Las distancias utilizadas para los parámetros de búsqueda se diseñaron para coincidir con la anisotropía de cada estructura.

Esto se logró mediante el uso de un elipsoide de búsqueda en el que se utilizó una segunda búsqueda que es igual al doble del alcance de la primera vecindad de búsqueda de acuerdo con la

dirección con mayor continuidad, es decir, las direcciones de los ejes de los elipsoides de búsqueda coinciden con las direcciones definidas en el análisis de la variografía. La Tabla 6.5 muestra los parámetros de los variogramas seleccionados de la Mina Catalina Huanca para todas sus estructuras. (Ver fig. 5.20). (Tabla 5.5).

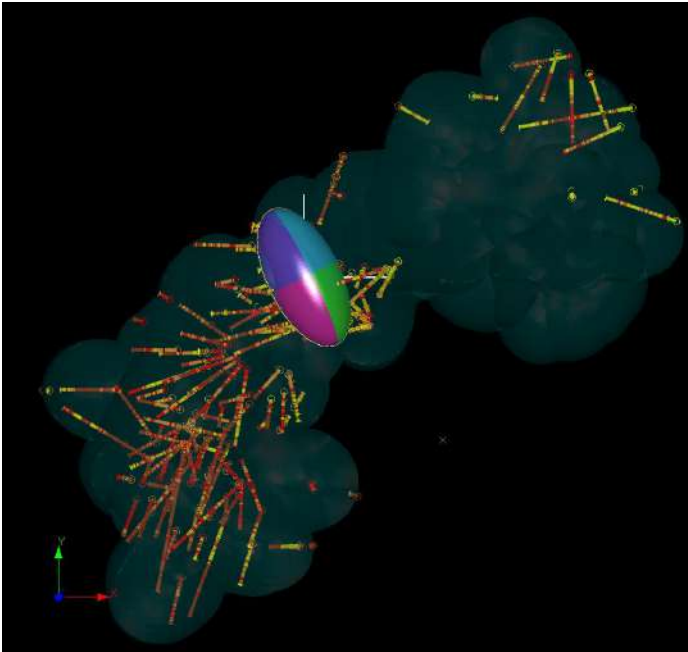


Figura 5.20 Elipsoide de búsqueda resultante para el dominio de caliza en la estructura de Mariela 4. (Fuente: Propia)

Estructura	Dominio	Variogramas															
		ANG_X	ANG_Y	ANG_Z	NUGGET	ST1PAR1	ST1PAR2	ST1PAR3	ST1PAR4	ST2PAR1	ST2PAR2	ST2PAR3	ST2PAR4	ST3PAR1	ST3PAR2	ST3PAR3	ST3PAR4
Melissa	Arenisca	76.74	8.77	-14.45	32.38	6.34	7.60	4.58	17.66	27.03	13.55	16.33	10.36	45.51	30.54	45.19	24.54
	Conglomerado	126.92	10.40	-16.05	22.83	21.46	15.24	11.24	31.73	55.52	30.48	22.48	9.52	87.86	53.17	33.72	35.40
Doña María Piso	Conglomerado	137.77	-11.75	-169.45	26.41	3.62	3.18	6.84	29.48	15.23	9.30	18.62	11.04	35.83	26.90	32.89	31.73
Mariela 4	Conglomerado	68.56	-14.43	-76.98	33.65	9.65	6.80	5.51	53.52	16.52	20.75	18.76	14.17	29.20	38.49	59.60	1.81
	Caliza	153.72	0.21	-166.93	23.50	7.07	7.86	12.53	34.23	19.74	31.74	20.54	10.84	37.23	75.06	37.27	30.55

Tabla 5.5 Parámetros de búsqueda de las estructuras mineralizadas de la mina Catalina Huanca. (Fuente: Propia)

### 5.1.5. Plan de Krigging

En todos los subdominios definidos se empleó el plan Kriging ordinario como método de estimación, debido a la disponibilidad de controles geológicos y al espaciamiento de las muestras, usando los parámetros variográficos y elipsoides de búsqueda generados.

El plan de kriging es un método de estimación creado principalmente para realizar cálculos locales aproximados a los valores de las muestras y representarlos en bloques. Así es como el valor calculado debe ser aproximado al valor real, sin sesgo y con el objetivo de mitigar la varianza de errores. El método de kriging radica en el cálculo ponderado de una población de muestras y designar un nivel de importancia para cada una de las muestras que tienen lugar en la estimación o de manera grupal. El cálculo ponderado se realiza, tomando en cuenta la correlación de la variable cuantificada, en este caso el valor RMR<sub>89</sub>. La herramienta llamada “Función Variograma” garantiza que la estimación sea no sesgada, en otras palabras, sirve para eviat el error sistemático. El plan de kriging ordinario perfecciona la estimación, debido a que minimiza la varianza de estimación, tomando en consideración las características geológicas, geomecánicas, características geométricas, los parámetros de rotación y búsqueda, sacando el máximo provecho posible de la información disponible (Caballero, 2010).

Por lo tanto, se empezó dimensionando la zona que abarca la estimación e ingresando los parámetros establecidos, como el tamaño de celdas y el subceldado, los volúmenes de búsqueda, etc.



### 5.1.5.1. Estimación mediante Kriging Ordinario (OK)

Se utilizó el software de modelamiento y estimación Studio Rm, para construir el modelo de bloques mediante el método de estimación kriging ordinario, ya que proporciona la mejor estimación lineal insesgada. Dentro de los parámetros del modelo se estableció el tamaño de celdas de 4x4x4 m, siendo un tamaño óptimo desde el punto de vista operativo ya que equivale a las dimensiones estándares de minado en la mayoría de los casos, si bien es cierto que el reducir el tamaño de celda dará un resultado más detallado, esta no siempre es la opción más acertada, ya que los archivos extremadamente pesados se vuelven prácticamente inutilizables, y más importante aun el alcance para el análisis geomecánico no requiere tanto nivel de detalle. En el caso de Mariela 4, como parámetro de estimación de bloques se utilizó un elipsoide con un mínimo de 4 muestras y un máximo de 16, en base a la longitud de composito, es decir, se necesita mínimo 4 muestras de 1 metro para completar un bloque de 4x4x4m de dimensión. (Ver fig. 5.21, 5.22).

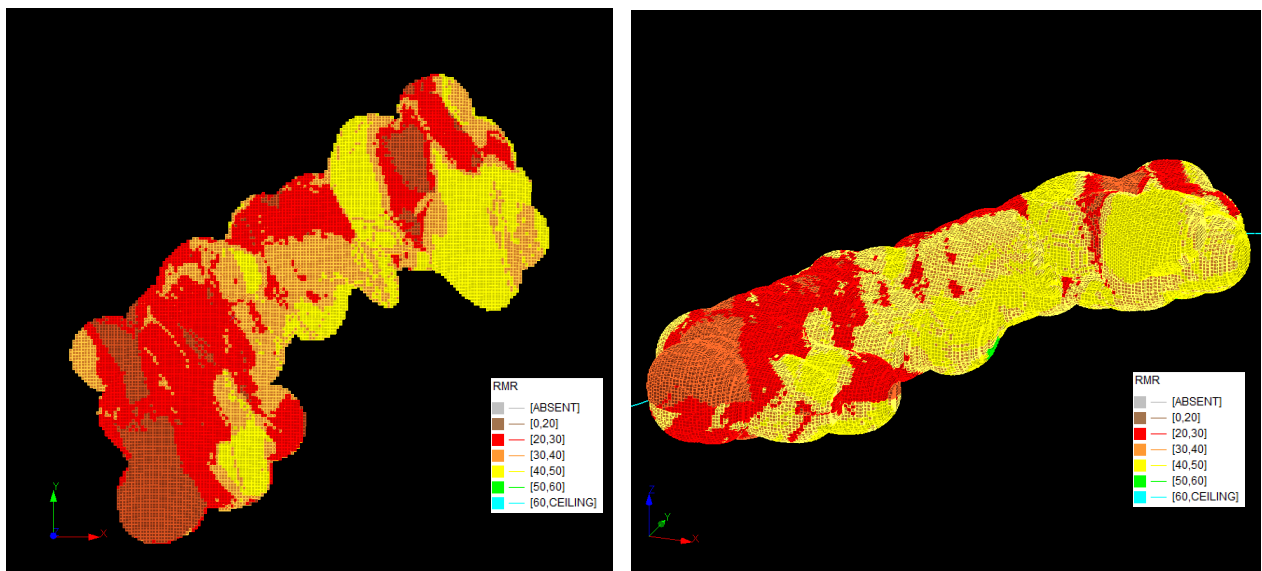


Figura 5.21 Estimación de Modelo de Bloques de RMR, estructura Mariela 4. (Fuente: Propia)

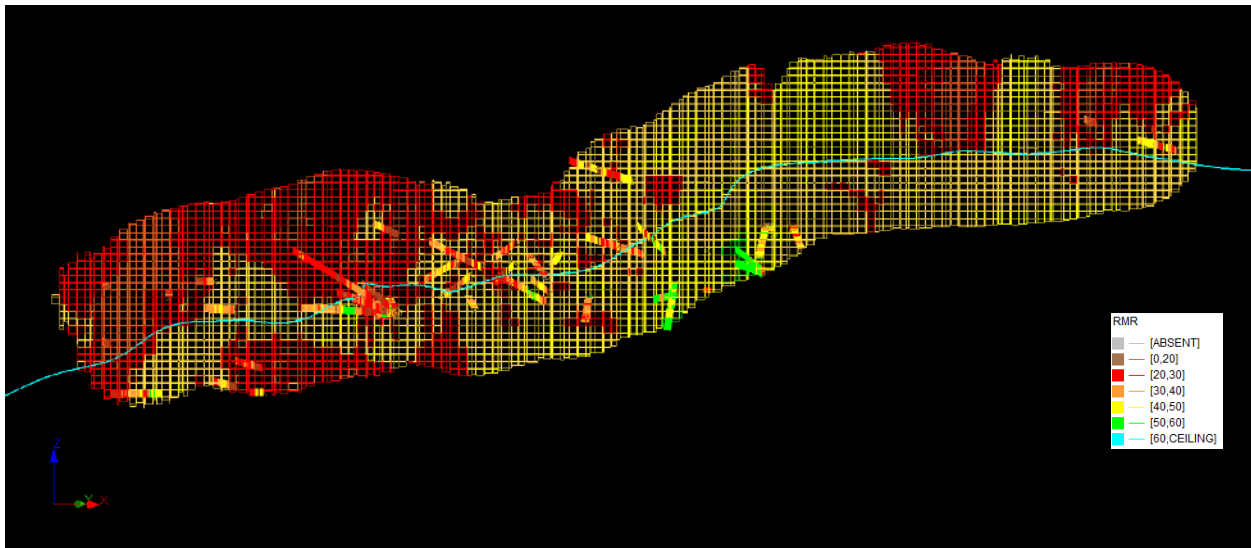


Figura 5.22 Modelo de Bloques de RMR, estructura Mariela 4, sección E-W. (Fuente: Propia)

En estos modelos geomecánicos, cada celda tiene valores y características únicas, en funciones a los análisis previamente realizados, siendo la variable de la calidad de roca la que nos orientara en la toma de decisiones en temas como la explotación, el tipo de sostenimiento o la posibilidad de la continuidad de fallas en profundidad. La suma de toda esta información será la base del modelamiento, que se traduce en el valor de la variable RMR<sub>89</sub> para cada uno de los bloques. Es necesario mencionar que teniendo un conocimiento más certero de la calidad del macizo rocoso se puede seleccionar de mejor manera los sistemas de sostenimiento más favorables para las labores a desarrollar. (En el anexo F se adjunta las estimaciones resultantes de todos los cuerpos). (Ver fig. 5.23).

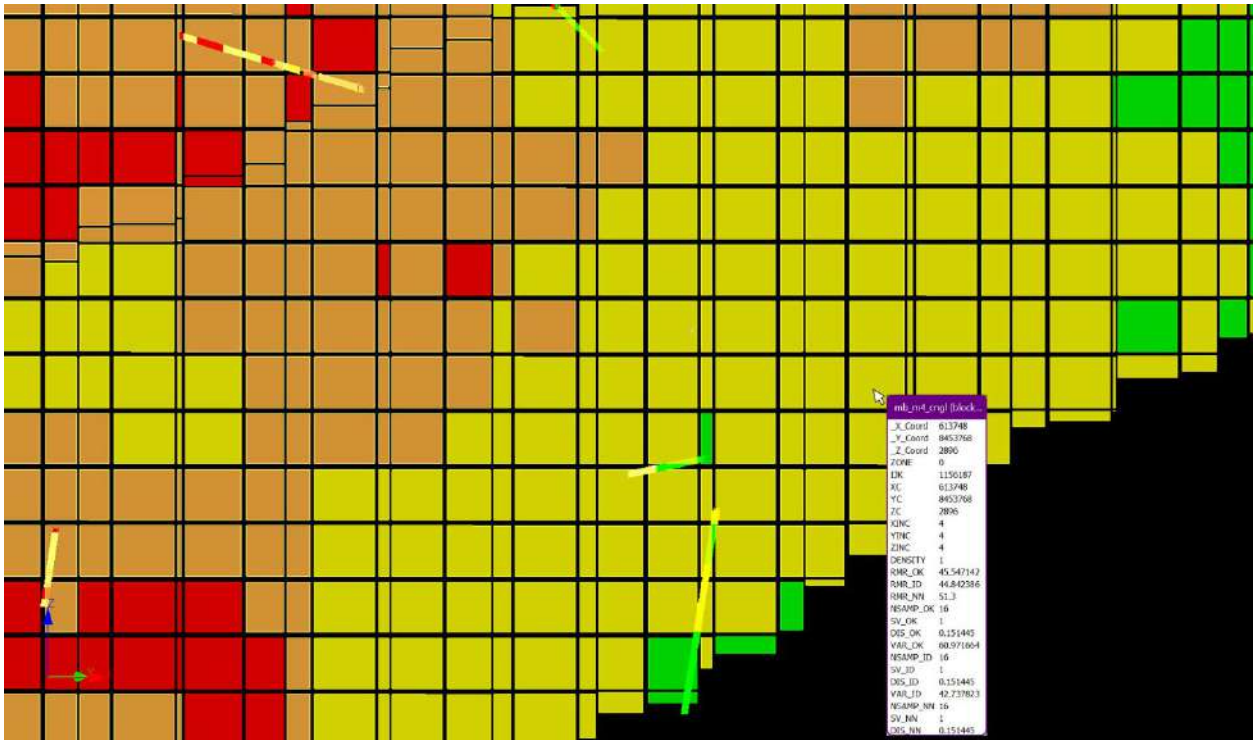


Figura 5.23 Información que contiene cada bloque del modelo. (Fuente: Propia)

## 5.2. MODELO SISMICO

La realización de los modelos sísmicos se hizo con data de 2950 eventos, procesados desde el 18 de septiembre del 2022 hasta el 26 de diciembre del año 2023, la magnitud registrada de menor intensidad es de -1.9 y la de mayor magnitud fue de 1.7, todos ellos se encuentran en la zona de influencia del área de minado y sus zonas aledañas.

Cabe indicar que se realizó solo con data de eventos normales, ya que durante el monitoreo también se llega a obtener datos de otros eventos anómalos como ruido sísmico, tránsito de maquina pesada con excesiva vibración, procesos de voladura, entre otros. (Ver fig. 5.24).

<b>DEFAULT</b>		
<b>Total number of events:</b> 2950		
<b>Filters</b>		
Time:	All Time	
Parameters (AND):	Normal Events (LS)	
<b>Parameter Ranges</b>		
Event Time:	18 sep 2022 21:04:32	26 dic 2023 02:11:01
Local Magnitude:	-1.9	1.7
Moment Magnitude:	-1.9	1.7
Trigger:	3	8
<b>Events by Type</b>		
Normal:	2950	
Blasts:	0	
Rejected Blasts:	0	
Rejected:	0	
Other states:	0	
<b>Total:</b>	<b>2950</b>	
<i>Moment Tensors:</i>	15	

Figura 5.24 Data de eventos normales procesados por el sistema microsismico del IMS-CH. (Fuente: Propia)

Los datos obtenidos con el sistema de monitoreo microsismico, principalmente muestran la ubicación espacial donde ocurrieron los eventos dentro de la mina, hora y fecha de cada evento, además de calcular principalmente la magnitud local de los eventos (equivalente a la escala de Richter), la energía sísmica, la potencia sísmica, radio de fuente y otros. (Ver fig. 5.25, 5.26).

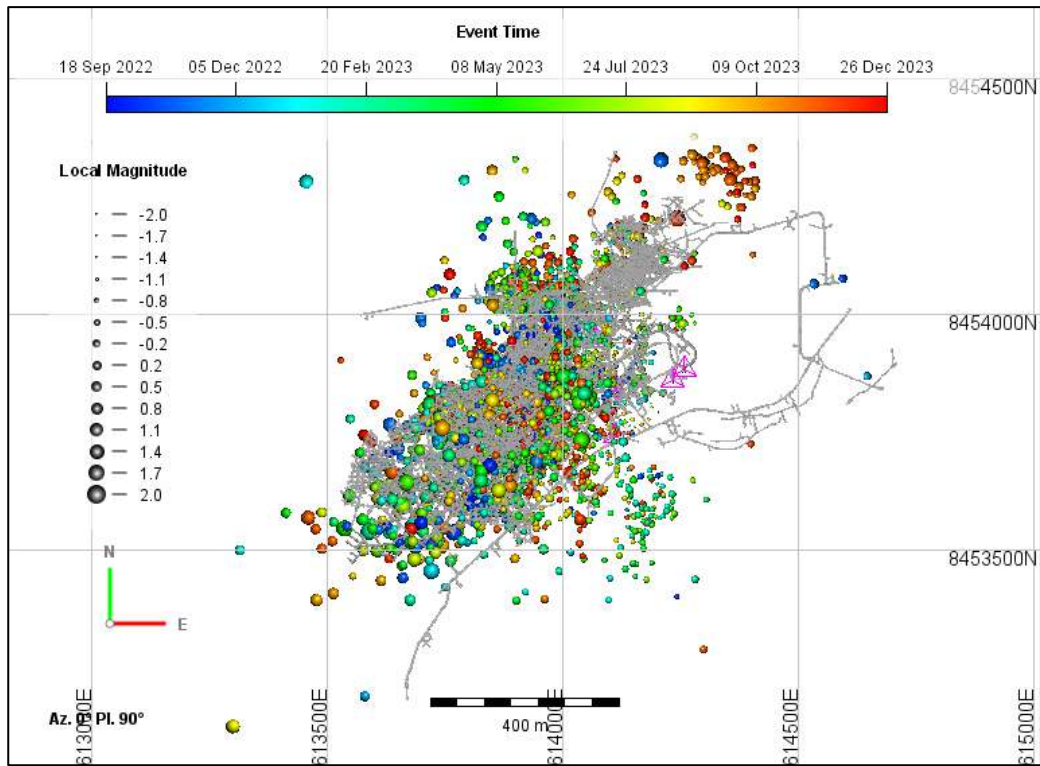


Figura 5.25 Eventos microsismicos registrados dentro de CH, vista en planta. (Fuente: Propia)

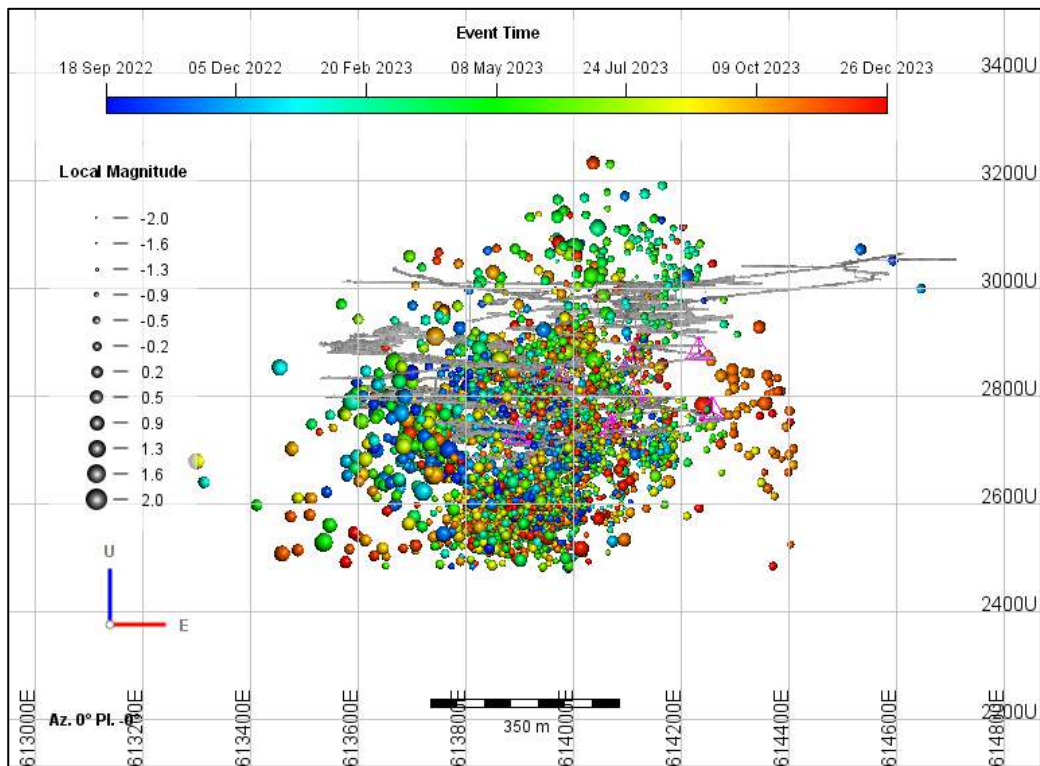


Figura 5.26 Eventos microsismicos registrados dentro de CH, vista W-E. (Fuente: Propia)

El parámetro utilizado para la realización del modelo sísmico es el Energy Index (índice de energía), el cual se obtiene de dividir de la energía sísmica entre la potencia sísmica emitida por un determinado evento, todo esto en valores logarítmicos. (Ver fig. 5.27).

$$EI = E/\bar{E}(P)$$

Donde: EI: Índice de energía

E: Energía sísmica

E(P): Potencia sísmica

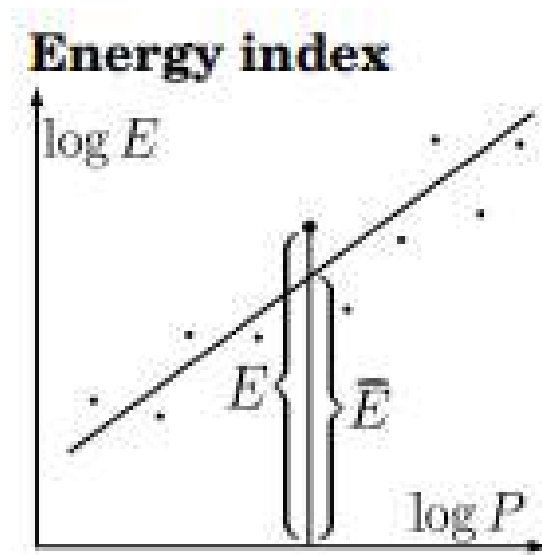


Figura 5.27 Índice de energía. (Fuente: Propia)

Se realizó modelos sísmicos con el índice de energía para diferentes cuerpos dentro de la mina, tanto en la parte superior para el cuerpo Mariela 4, parte intermedia cuerpo Doña Maria Piso y en profundización para el cuerpo de Melissa. (Ver fig. 5.28, 5.29).

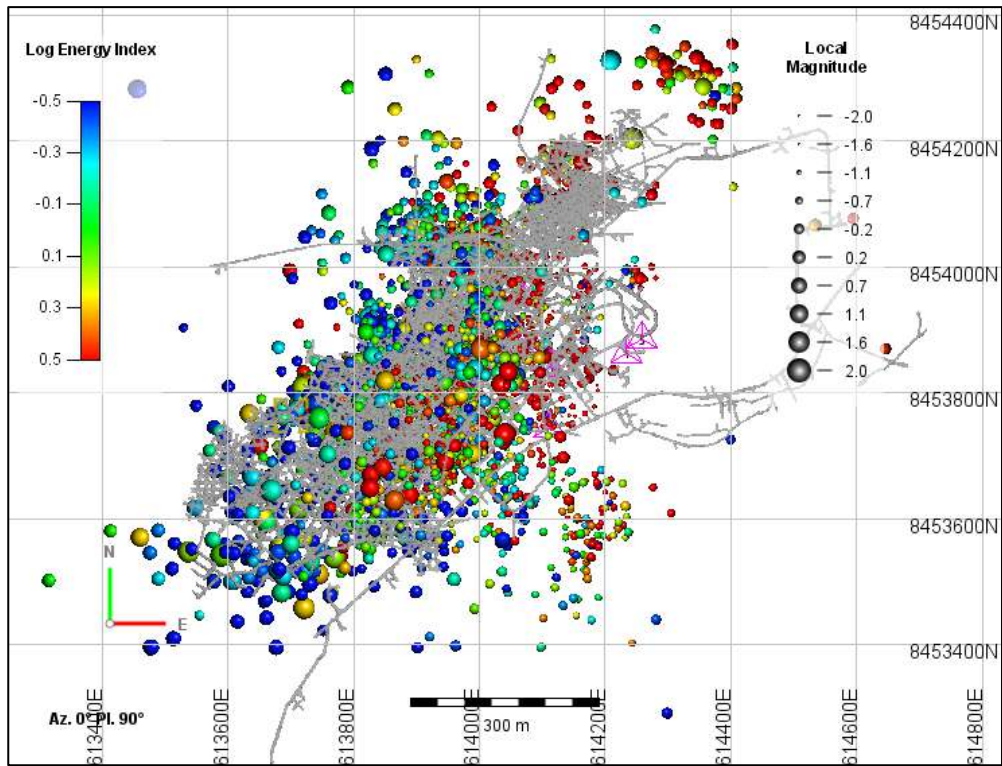


Figura 5.28 Índices de energía de los eventos y su magnitud local, vista en planta. (Fuente: Propia)

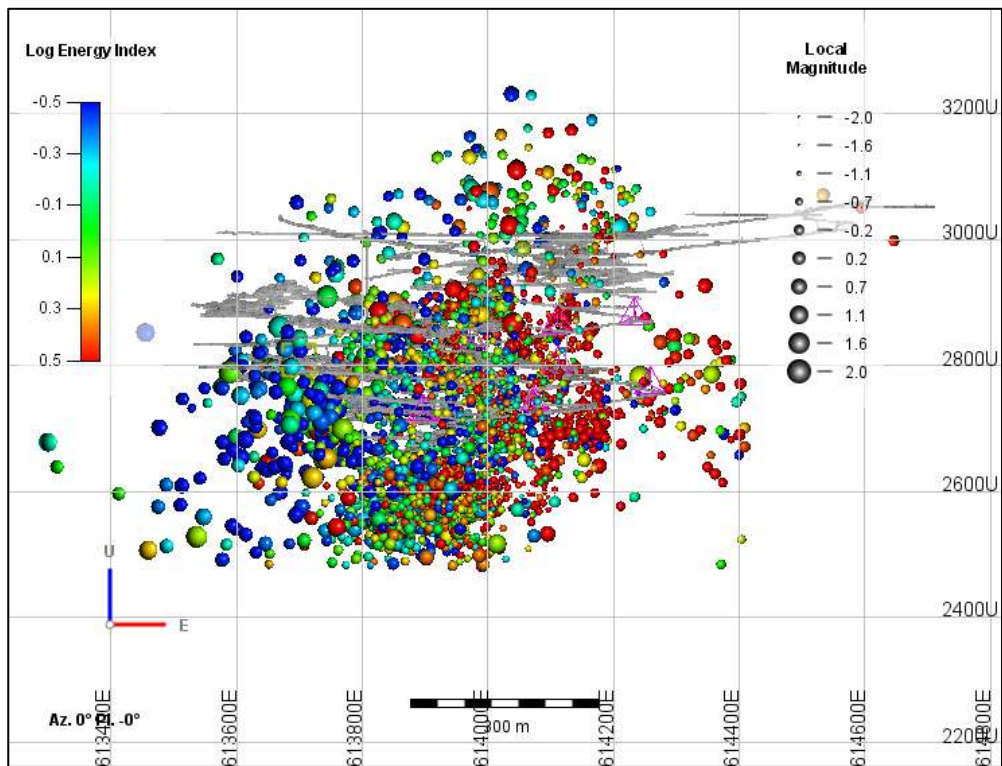


Figura 5.29 Índices de energía de los eventos y su magnitud local, vista W-E. (Fuente: Propia)

En el cuerpo Mariela 4, la litología en la parte superior del cuerpo es caliza gris, calizas bituminosas y calizas argilizadas, con calidades de roca regular a muy mala, también abarca el contacto litológico entre caliza y conglomerado, el conglomerado principalmente es pardo a rojizo, con calidad de roca regular a mala principalmente en el contacto.

En el sector central hacia el noreste, los índices de energía se muestran más elevados por encima de -0.1 hasta aproximadamente 0.3, lo que sugiere que la calidad de roca es regular y por ello las ondas sísmicas se transmiten de mediana a mayor energía.

Por el contrario, en el sector central hacia el suroeste del cuerpo, se muestra índices de energía bajos, lo que sugiera un tipo una calidad de roca de mala a muy mala, por lo que la energía transmitida es mucho menor que en el sector este. (Ver fig. 5.30) (Anexos G).

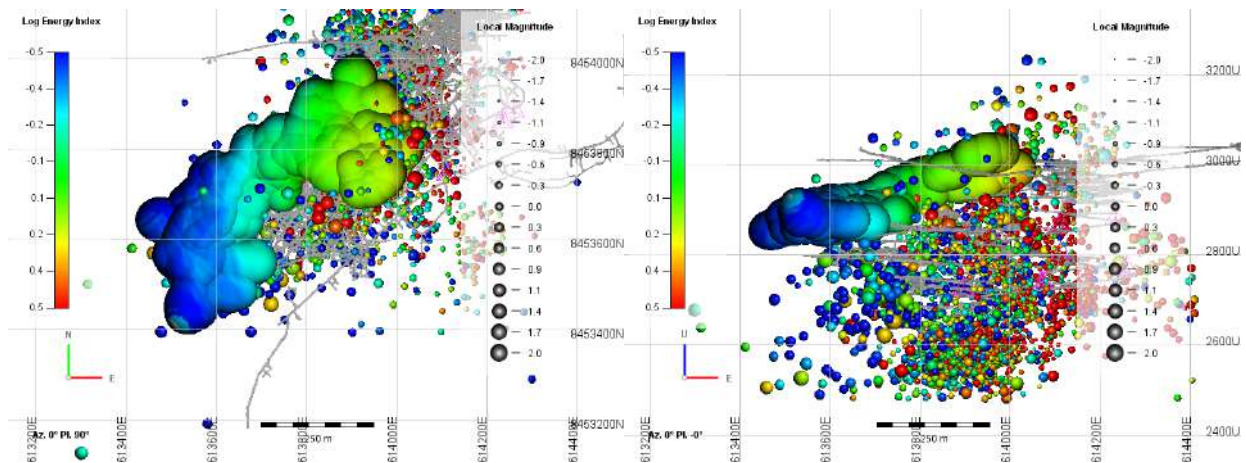


Figura 5.30 Modelo sísmico de índices de energía del cuerpo Mariela 4. (Fuente: Propia)



### 5.3. VALIDACION DEL MODELO DE BLOQUES

Los modelos estimados fueron verificados mediante métodos estadísticos de comparación e inspecciones visuales.

Por lo tanto, la validación visual que se llevó a cabo con el software Datamine comparó las leyes compuestas y las leyes de bloques para cada área de estudio en vistas en sección, en planta y longitudinal, independientemente del espaciamiento entre muestras.

Como métodos de comparación estadísticos se utilizaron los gráficos de “swath plot” y la validación sísmica.

#### 5.3.1. Validación visual

En base al método de observación se pudo verificar que había una correspondencia entre los bloques estimados y los valores iniciales proporcionados por las muestras de cores. Se observó una buena correlación en la distribución de muestras y los valores estimados, sin diferencias significativas y sin necesidad de suavizar excesivamente los datos del modelo de bloques. (Ver fig. 5.31).

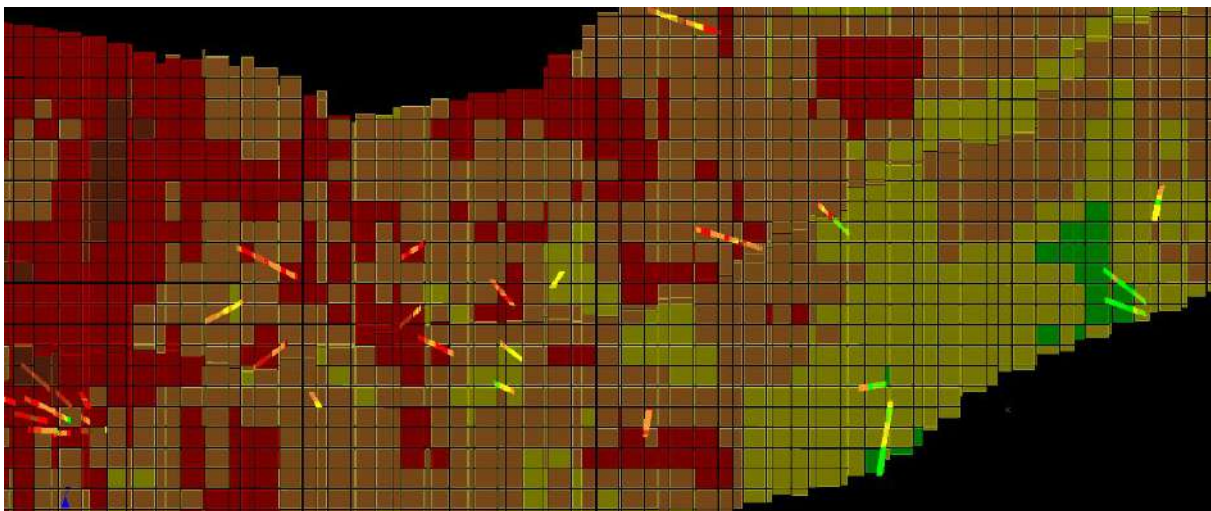


Figura 5.31 Validación visual, sección transversal se observa la concordancia de los bloques del modelo con los sondajes (líneas de color resaltante). (Fuente: Propia)

### 5.3.2. Gráficos de Swath Plots

Se puede utilizar una variedad de valores potenciales para definir los variogramas modelados, la estimación y los rangos de búsqueda. Se realizó una validación cruzada, para comprobar estos valores. Esta técnica implica comparar el resultado de estimación de un mismo punto con diferentes estimadores de acuerdo a un determinado eje (X, Y o Z). Se repetiría el proceso para todos los puntos que resultan de la estimación y se encuentran en el mismo eje, el valor promedio estimado mediante Kriging Ordinario (OK) se compara con el valor promedio de la estimación por “inverso a la distancia” (ID) y del “vecino más cercano” (NN). Este método es útil para definir correctamente los parámetros de los variogramas modelados y el método de estimación, a partir de gráficos “swath plot”, donde se evidencio que la diferencia entre la estimación y las muestras está en un rango aceptable para la practicidad del estudio. Los cálculos se hicieron en los tres ejes de dirección como se muestra en las figuras 6.32, 6.33 y 6.34.

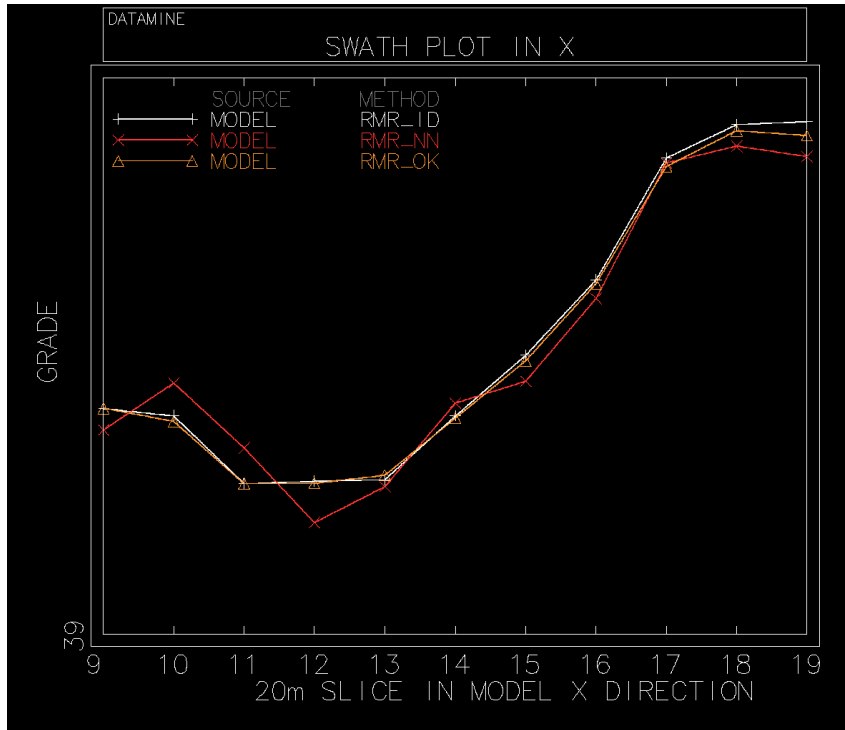


Figura 5.32 SWATH PLOT en eje X, donde rojo es la estimación del vecino más cerca, blanco estimación por inverso a la distancia y naranja estimación de kriging ordinario. (Fuente: Propia)

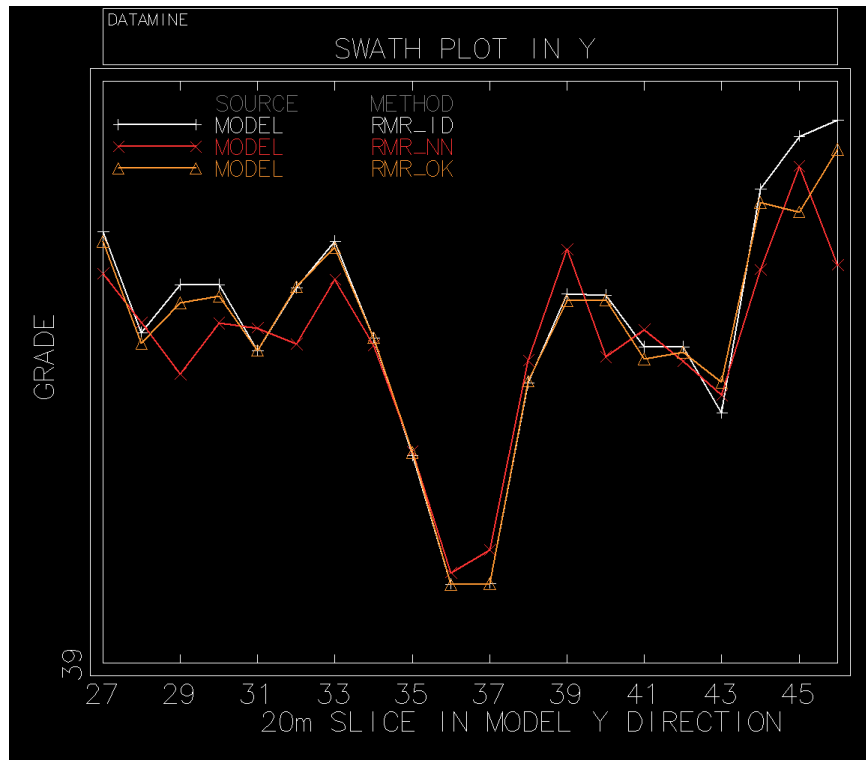


Figura 5.33 SWATH PLOT en eje Y. (Fuente: Propia)

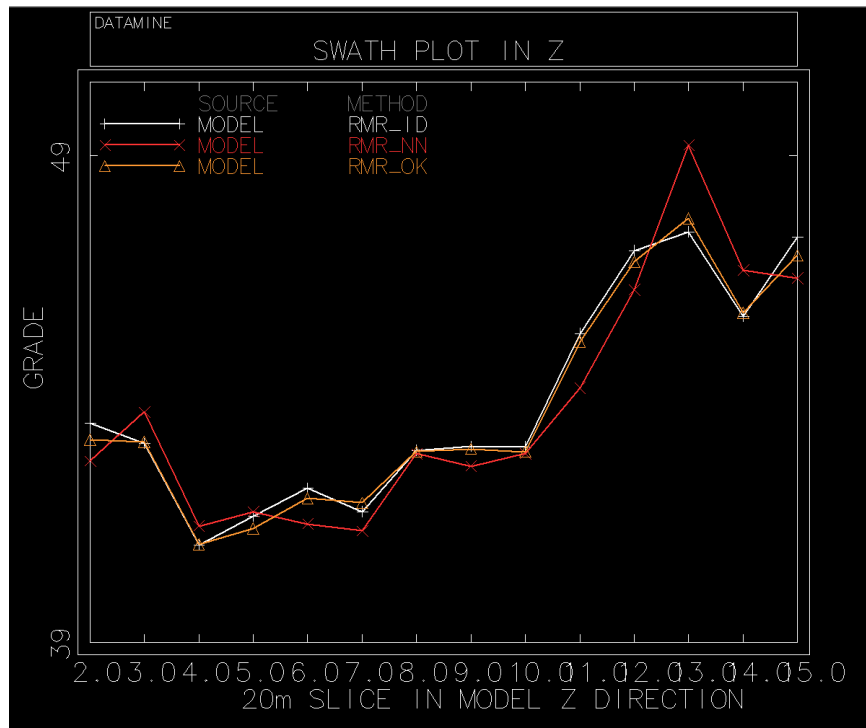


Figura 5.34 SWATH PLOT en eje Z. (Fuente: Propia)

### 5.3.3. Validación sísmica

La validación de un modelo geomecánico con un modelo sísmico es esencial para garantizar la fiabilidad de las predicciones. Inicia con la construcción de un modelo geomecánico en 3d, y luego un modelo sísmico que representa las características de la propagación de ondas dentro la roca, considerando las propiedades elásticas y plásticas de los materiales.

La validación implica comparar el resultado de las simulaciones con los datos geomecánicos y de campo para asegurar que el modelo geomecánico refleje con precisión la respuesta sísmica observada. Ajustar nuestros parámetros a la hora de realizar el modelo geomecánico es crucial para mejorar la concordancia entre las simulaciones y los datos reales.

El proceso de validación se realiza mediante la comparativa visual con un modelo sísmico, es aplicado para una validación global del modelo geomecánico en 3D y realizar una zonificación geomecánica más amplia de la mina.

Se aplica restringidamente en zonas de menor escala, debido a que existe mayor variación local de calidad del macizo rocoso, lo cual no se refleja tanto a una escala mayor a nivel de la mina; pero esto se va consolidando a mayor registro de información de eventos con el pasar del tiempo, ya que tiene un espectro cada vez más amplio y poblado dentro de la zona de influencia en la mina. Es decir que, a mayor cantidad de eventos el modelo sísmico tendrá un mayor grado de certeza.

Para el caso del cuerpo Mariela 4, existe una buena correlación entre los indicadores reflejados en ambos modelos, el sector oeste del cuerpo muestra bajos niveles de índices de energía lo cual corrobora lo mostrado en el modelo geomecánico, ya que en este sector nos muestra roca de mala a muy mala calidad. Lo contrario ocurre en el sector este, donde se muestran índices de energía medianos a altos y el modelo geomecánico refleja roca de regular calidad. (Ver fig.5.35, 5.36) (Anexos H).

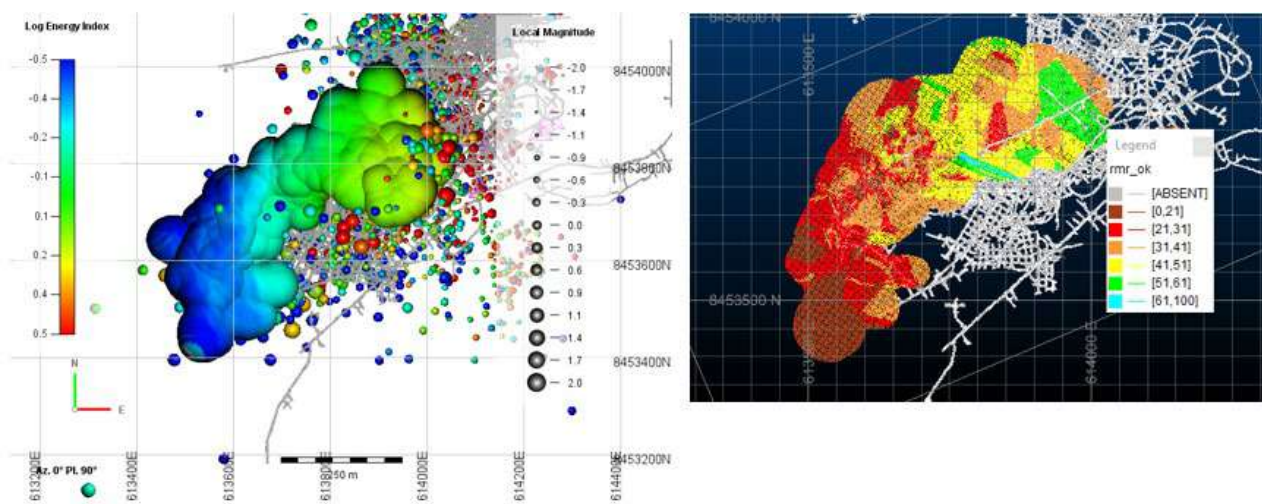


Figura 5.35 Validación sísmica del modelo geomecánico - Mariela 4. (Fuente: Propia)

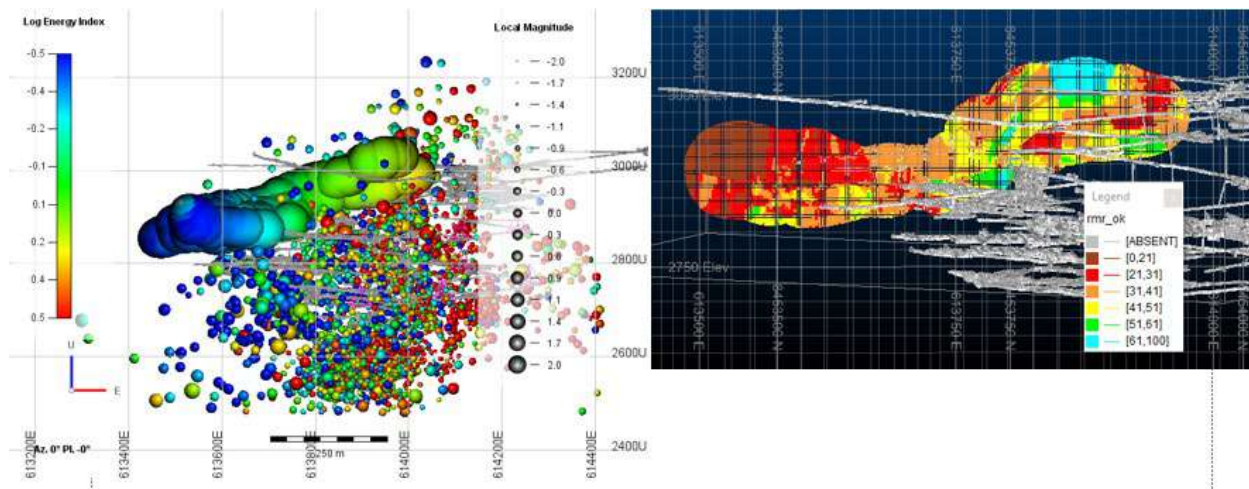


Figura 5.36 Validación sísmica del modelo geomecánico - Mariela 4 (Fuente: Propia)

## 5.4. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS DE LA ESTIMACION

### 5.4.1. Zonificación geomecánica

Para los trabajos pertinentes y tomando en cuenta la programación de avances y tajos programados, se plasmó las celdas con valoración RMR generadas sobre los proyectos de labores y tajeos, con el fin de conocer la calidad que la roca tendría en estas áreas, esto es utilizado en adelante para el diseño de las labores, tanto de desarrollo como de preparación. De este modo se presenta planos con el corte del modelo en la zona de interés y poder realizar el dimensionamiento de las labores adecuado según la calidad de la roca. (Tabla 5.6).

DISEÑO DE EXCAVACIÓN SEGÚN LA ZONIFICACIÓN GEOMECÁNICA				
Tipo de Roca		RMR	Color RMR	Dimensión de Labores
Buena	II	61 - 80	Azul	5.0 m x 5.0 m
Regular	III-A	51 - 60	Verde	5.0 m x 5.0 m
Regular	III-B	41 - 50	Amarillo	4.5 m x 4.5 m
Mala	IV-A	31 - 40	Anaranjado	4.5 m x 4.0 m
Mala	IV-B	21 - 30	Rojo	4.0 m x 4.0 m
Muy mala	V	< 20	Marrón	4.0 m x 4.0 m

Tabla 5.6 Diseño de excavación (Fuente: Propia)

La continuidad espacial de la calidad del macizo rocoso, confirmada por los variogramas, es una consideración importante al asignar la clasificación RMR de la misma. Las características del variograma influyen fuertemente en la calidad de la estimación, como la eficiencia del kriging, la escala de la estimación, la configuración y la cantidad de datos. Las estimaciones de volúmenes pequeños con poca información son de peor calidad que las estimaciones de volúmenes grandes. Es por ese motivo que se presenta la estimación con cortes por niveles dependiendo del avance operativo programado mensual, semanalmente o cuando se requiera. (Ver fig.5.37). Entonces se observa una similitud entre el valor RMR asignado a las labores subterráneas mediante el mapeo por celdas y el valor proveniente de la estimación, al guardar estar una correlación notoria, nos da la confianza de esperar la calidad de roca asignada por la estimación en las zonas donde se proyecta el avance de labores.

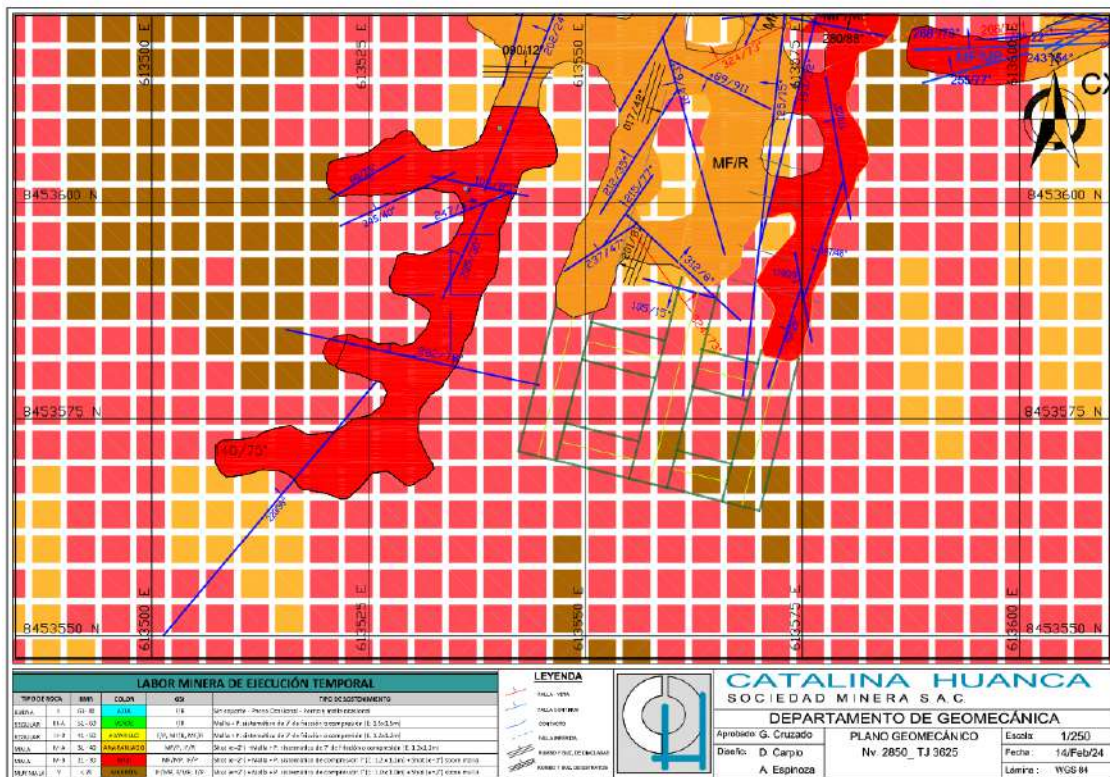


Figura 5.37 Mapa geomecánico con estimación del modelo de bloques en zonas de avance programado. (Fuente: Propia)

### 5.4.2. Elección del tipo de sostenimiento

El tipo sostenimiento a aplicar en Catalina Huanca, va a depender del tipo de fase y tiempo de duración de abertura de las excavaciones, es así que las dividimos en excavaciones permanentes (> a 12 meses de duración), y excavaciones temporales (< a 12 meses de duración).

Las excavaciones permanentes, contemplan la fase de desarrollo de la mina, como vienen a ser zonas de infraestructura (oficinas, polvorines, almacenes, pozas, etc), rampas principales, accesos principales, cámaras de carguío, cámaras de tolveo, subniveles permanentes, by pass, cámaras especiales, accesos hacia chimenas y raise bore, etc.

Las excavaciones temporales, contemplan la fase preparación, que vienen a ser algunos subniveles temporales, cruceros de preparación para explotación, galerías, tajeos, y labores que tendrán una duración menor al tiempo indicado.

Como principales elementos de sostenimiento tenemos el uso de shotcrete (concreto lanzado), con una dosificación de resistencia de 30 MPa y/o 300 kg/cm<sup>2</sup>; malla electrosoldada; pernos de fricción tipo Split Set de 7' y de resistencia a la fricción de 7 Tn; y pernos de compresión tipo Swellex 7' de resistencia a la fricción de 14 Tn. (Tabla 5.7).

LABOR MINERA DE EJECUCIÓN PERMANENTE					
TIPO DE ROCA	RMR	COLOR RMR	GSI	TIPO DE SOSTENIMIENTO	
BUENA	II	61 - 80	AZUL	F/B	Perno sistematico de fricción o compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
REGULAR	III-A	51 - 60	VERDE	F/R	Shotcrete (e=1") + malla electrosoldada #11 + perno sistemático de fricción o compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
REGULAR	III-B	41 - 50	AMARILLO	F/P, MF/B, MF/R	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #10 + perno sistemático de compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
MALA	IV-A	31 - 40	ANARANJADO	MF/P, IF/R	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #10 + perno sistemático de compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m) + shotcrete (e=1") sobre malla
MALA	IV-B	21 - 30	ROJO	MF/MP, IF/P	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #8 + perno sistemático de compresión de 7' (espaciado 1.2m x 1.2m) + shotcrete (e=2") sobre malla
MUY MALA	V	< 20	MARRÓN	IF/MP, T/MP, T/P	Shotcrete (e=2") preventivo + perno sistemático de compresión de 7' + cimbras metalicas H6 (espaciado 1.0m a 1.5m)



LABOR MINERA DE EJECUCIÓN TEMPORAL					
TIPO DE ROCA		RMR	COLOR RMR	GSI	TIPO DE SOSTENIMIENTO
BUENA	II	61 - 80	AZUL	F/B	Sin soporte o perno de fricción de 7' ocasional
REGULAR	III-A	51 - 60	VERDE	F/R	Malla electrosoldada #11 + perno sistemático de fricción o compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
REGULAR	III-B	41 - 50	AMARILLO	F/P, MF/B, MF/R	Malla electrosoldada #10+ perno sistemático de fricción o compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
MALA	IV-A	31 - 40	ANARANJADO	MF/P, IF/R	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #10 + perno sistemático de fricción o compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m)
MALA	IV-B	21 - 30	ROJO	MF/MP, IF/P	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #8 + perno sistemático de compresión de 7' (espaciado 1.5m x 1.5m) + shotcrete (e=1") sobre malla
MUY MALA	V	< 20	MARRÓN	IF/MP, T/MP, T/P	Shotcrete (e=2") + malla electrosoldada #8 + perno sistemático de compresión de 7' (espaciado 1.2m x 1.2m) + shotcrete (e=2") sobre malla

Tabla 5.7. Tipo de sostenimiento según RMR Fuente: propia

#### 5.4.2.1. Validación del sostenimiento con el índice Q de Barton

Desde el logueo geomecánico y el mapeo mediante celdas de las labores subterráneas, se tiene como dato adicional el índice Q de Barton, donde el valor del parámetro RQD a lo largo de los tramos es relativamente variable, encontrándose valores muy bajos en zonas de falla y mientras nos alejamos de estas se evidencia la mejora en este valor, llegando a valores aproximadamente de 85% lo que significa una calidad de roca buena.

El valor de  $J_n$  se consiguió a partir del número de planos principales en el análisis de discontinuidades. El parámetro  $J_r$ , su rugosidad se tomó en los planos de las discontinuidades usando como base los perfiles propuestos por Barton donde los divide en 3 clases (se puede apreciar en el anexo I). El valor  $J_a$  está en relación con el grado de alteración en las juntas, siendo de gran relevancia el tipo de relleno que puedan tener, en las zonas estudiadas el tipo de relleno es muy variable, desde relleno de arcillas expansivas hasta rellenos de cuarzo soldados o patinas de mineral de relleno.

Como últimos parámetros son  $J_w$  y SRF, el primero se mantiene constante de 1 en las muestras de logeo ya que es impreciso determinar un valor certero en estas, mientras que en interior mina varia de 0.66 a 1, el valor SRF se mantiene constante en ambos casos con una puntuación de 2.5 debido a que la profundidad de excavación en las labores actuales es mayor a 50 m con zonas de fracturas aisladas.

Finalmente, se hizo la correlación entre  $RMR_{89}$  con el índice Q de Barton, mediante la expresión  $RMR=9*LN(Q) + 44$  propuesta por Bieniawski, pero tomando en cuenta factores influyentes como son esfuerzos insitu por profundizaciones mayores a 500 metros entre otros; y así poder definir el tipo de sostenimiento adecuado. (Ver figura 5.38).

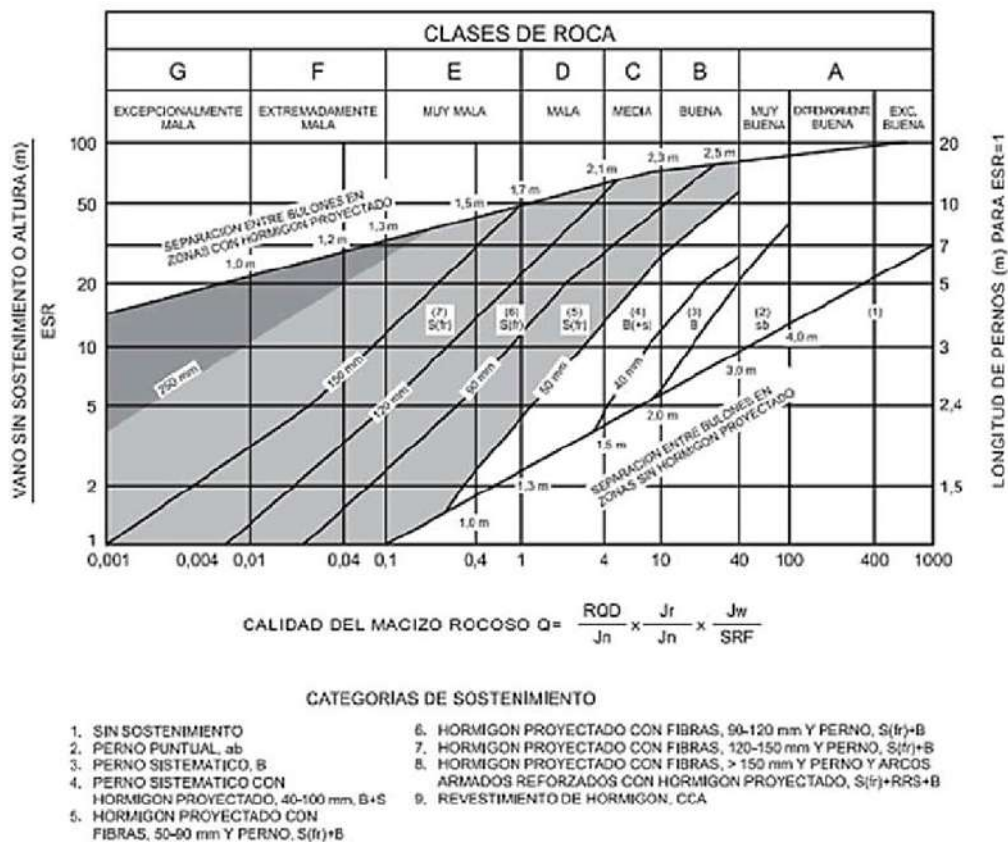


Figura 5.38. Sostenimiento permanente e índice Q (Carvajal, 2008)

## CONCLUSIONES

- Se generó una base de datos basada en el logueo geomecánico de 977 sondajes, que posee gran variabilidad en la calidad del macizo rocoso con un fuerte control litológico, la zona de caliza presenta calidades de roca más bajas mientras que en zonas de conglomerado y areniscas mejoran la calidad de macizo rocoso.
- A partir de los mapeos de las labores subterráneas, se observó in situ la variación de la calidad de roca identificando fallas principales, zonas con mayor diaclasamiento y presencia de agua, todos estos parámetros también fueron tomados en cuenta al momento de generar los modelos geomecánicos.
- Se realizó en primera instancia un análisis estadístico de datos, obteniendo como resultado para todas las zonas estudiadas utilizar la composición a 1.0 m, debido a que en esta medida se tiene mejor pérdida de información y menor varianza con respecto a la data original,
- Posteriormente para los siguientes estudios estadísticos se divide por subdominios delimitados por la litología identificada en la roca encajonante de cada sector
- Para el subdominio del conglomerado se define como valor de cabeza de 59 en RMR, la zona de areniscas 56 en RMR, la zona de caliza 58 en RM y las zonas de falla tiene como valor máximo 19 en RMR.
- En el análisis geoestadístico de datos el elipsoide de búsqueda resultante para Mariela 4 en el subdominio de la caliza es de orientación 154, 0, -167, el subdominio del conglomerado es 69, -14, -76; para Doña María Piso es 138, -12, -169 (teniendo como único subdominio

el conglomerado) y para Melissa en el subdominio arenisca es 77, 9, -14, y en el subdominio conglomerado resulto 127, 10, -16.

- Para la zona de Mariela 4, el modelo geomecánico 3D resultante en base al valor  $RMR_{89}$ , muestra un macizo rocoso malo tipo IV-B, a regular tipo III-B, donde se observa que mejora ligeramente hacia el NE, la zona geomecánicamente más inestable corresponde al extremo SW donde la calidad del macizo sería muy mala, de tipo V.
- Para la zona de Doña María Piso, el modelo geomecánico 3D obtenido basado en el  $RMR_{89}$ , muestra un comportamiento bastante homogéneo con calidades de roca que van mayormente de regular, tipo III-B a regular, tipo III-A, solo en la parte del extremo SW se evidencia una disminución de la calidad del macizo rocoso siendo la roca mala, de tipo IV-A, hasta mala tipo IV-B.
- Para la zona de Melissa, el modelo geomecánico obtenido, presenta calidad de roca predominante regular, tipo III-B, con pequeñas zonas dentro del dominio de arenisca que bajan hasta un macizo rocoso malo tipo IV-B, aunque estos son puntuales, mientras que, en el dominio del conglomerado, la calidad de roca mejora considerablemente llegando a una roca buena tipo II.
- Los métodos de validación, como la visual o swat plot, demuestra que la estadística de la variable trabajada ( $RMR_{89}$ ), tiene un intervalo de confianza del 95%, ya que tenemos correlación entre las muestras con el resultado de los modelos. Agregando también que, por la alta variabilidad de los datos se hace más factible el uso del método de “kriging ordinario”, ya que este es el más funcional para generar estimaciones en grandes distancias a diferencia del método “inverso a la distancia”.

- El método de validación sísmica nos permite tener una mayor certeza a gran escala y así poder determinar una zonificación geomecánica; la cual su principal función es, poder elegir métodos de minado masivo, que sean más rentables en el proceso de explotación con un valor de costo operativo inferior.

## RECOMENDACIONES

- Concebir la tarea de hacer rutinario el logueo geomecánico a lo largo de todo el sondaje y no solo en las zonas de interés, al igual que el mapeo litológico y geomecánico, ya que esto nos da una data más robusta y confiable para estimar valores en zonas no conocidas, debido a que el logueo geomecánico es una práctica común en casi toda actividad minera, es factible aplicar el método realizado en la presente tesis para cualquier contexto geológico incluyendo los más complejos. Este método es adaptable a todas la realidades y controles geológicos.
- Seguir alimentado la data de eventos microsísmicos, ya que, a mayor cantidad de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo, la validación de los modelos sísmicos será más exacto, y podrán ser usados también para realizar modelos geomecánicos 3D con mayor detalle.
- Ampliar el sistema de monitoreo microsísmico, para tener una mejor cobertura, recolección y certeza en el procesamiento de datos.
- Utilizar los modelos geomecánicos obtenidos como parte de la información fidedigna (ya que cuentan con un alto grado de confianza) al momento de hacer el análisis para elegir el tipo de sostenimiento adecuado para las labores subterráneas.

## BIBLIOGRAFIA

- Bardossy András (1997), Introduction to geostatistics. Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart. Alemania.
- Caballero Aguila R. (2010), Signal estimation with multiple delayed sensors using covariance information.
- Cressie Noel A. (1990), The origins of kriging, Mathematical Geology. Vol. 22. New York. pp. 239-252.
- Cruz Choquepata Jorge Eduardo (2016) Planeamiento de minado a corto plazo con la implementación de herramientas informáticas en CIA. Minera Catalina Huanca S.A.C. Trafigura Beheer B.V. Mining. Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa. Perú.
- De la Cruz Acevedo Martin (2020), Aplicación de Shotcrete vía húmeda para el sostenimiento de labores mineras en Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C. Tesis de grado. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo.
- Emery Xavier (2013), Geoestadística. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Ingeniería de minas. Universidad de Chile. Chile.
- Alberto Porras Velázquez (2014), Conceptos básicos de geoestadística. Diplomado en análisis de información geoespacial. Centro de investigación en geografía y geomática. CDMX, México.
- Espinel Pachón Iván Mateo. (2021), Mineralizing fluids in the Catalina Huanca carbonate-replacement Zn-Pb-Ag deposit, southern Peru. 19 th Swiss Geoscience Meeting. Geneva.

- Fernández A. y Alvarellos J. (2011), Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12. Puerto Rico. pp. 151.
- Gonzales De Vallejo, Luis (2002), Facultad de Ingeniería Geológica. Madrid : Pearson Educación. ISBN: 84-205-3104-9.
- Journel Andre G. (1989), Fundamentals of Geostatistics in Five lessons. Short course at the 28th International Geological Congress Washington. DC.
- Kaiser P. K. and Malovichko D. (2022), Energy and Displacement Demands Imposed on Rock Support by Strainburst Damage Mechanisms.
- Kitanidis Peter K. (1997), Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology. University of Cambridge. Inglaterra.
- Kuhn Max, Kjell Johnson (2013), Applied Predictive Modeling. Springer.
- Matheron Georges (1969), Curso de Geoestadística. Centro de Morfología Matemática de Fontainebleau. Francia.
- Mendecki, A. J. (2013), Characteristics of seismic hazard in mines: Keynote Address, in Proceedings 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, St Petersburg-Moscow, Russia, edited by A. Malovichko, R. Dyagilev, and D. A. Malovichko.
- Mendecki, A. J. (2013b), Frequency range, logE, logP and magnitude, in Proceedings 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, St Petersburg-Moscow, Russia, edited by A. Malovichko, R. Dyagilev, and D. A. Malovichko.



- Mercado Salas Gerald Enrique, Obregón Rivera Cecilia Jasmin (2017), Modelamiento geomecánico a nivel de prefactibilidad de una mina subterránea. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.
- Nielsen Allan A., (2009), Geostatistics and Analysis of Spatial Data, National Space Institute, Technical University of Denmark, Lyngby. Dinamarca.
- Quispe Mamani Luis Alberto (2018), Sistema de explotación en la mina Catalina Huanca S.A.C. sociedad minera. Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano. Puno.
- Ribeiro e Sousa Luís. (2013), Application of Data Mining techniques for the development of new geomechanical characterization models for rock masses. Guimarães. Portugal.
- Salazar P. Cecilia, Del Castillo G. Santiago (2018), Fundamentos básicos de estadística. Primera edición.
- Sandoval Custodio Rubén Javier (2019), Modelamiento geomecánico para la reducción de la incertidumbre del macizo rocoso, utilizando técnicas geoestadísticas en el estudio de prefactibilidad del túnel Nazareth, CIA. Minera San Rafael. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo.
- Vatcher J., McKinnon S.D., Sjöberg J. (2015), Developing 3-D mine-scale geomechanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine. Kiruna, Suecia.

## **ANEXOS**



# ANEXO B

## LOGUEO GEOMECANICO DESARROLLADO PARA LA UNIDAD MINERA CATALINA HUANCA

REGISTRO GEOMECANICO DE SONDAJE DIAMANTINO																										
TALADRO N°: DDH 2585	UBICACIÓN:	CA_9966							INCLINACIÓN:		-53°	LOGUEADO POR:		D.C.R.	Dpto Geomecanica											
FECHA: 18/09/2022	COORDENADAS:	N= 845381 E= 613906							DIRECCION:		128°	HOJA		01												
DE (m)	A (m)	LONG. PERI (m)	LONG. RECUP. (m)	% RECUP.	LITOLOGIA	GRAFIC	LONG. TROZOS (m)	RQD	RQD	$\alpha_m$ (mp.)	TIPO RELLENO	GS	UCS (Mpa)	RQD %	CONDICION DE JUNTAS	RMR	RMR	Q1	Q2	Q3	Q4	Descripcion de Roca				
																Pers	Aber	Rug	Re	Alt	Agua					
0.00	1.20	1.20	1.20	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO MINERALIZADO		0.35	29.16666667	29.2	24	ARCILLA	MF/R	2	8	5	2	3	1	1	2	10	34	39	0.57	0.23	MALA A
1.20	2.30	1.10	1.10	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO MINERALIZADO		0	0	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	1	1	1	2	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
2.30	8.00	5.70	5.70	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0	0	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	1	1	1	2	10	24	29	0.29	0.08	MALA B
8.00	20.00	12.00	12.00	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	33	21	0.08	0.03	MUY MALA
20.00	24.50	4.50	4.50	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.1	2.173913043	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	1	1	1	2	10	24	29	0.18	0.08	MALA B
24.50	27.00	2.40	2.40	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	1	0	7	14	22	0.09	0.03	MUY MALA
27.00	30.00	3.00	3.00	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0	0	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	1	0	1	1	10	24	29	0.19	0.08	MALA B
30.00	31.40	1.40	1.40	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.35	25	25.0	24	ARCILLA	MF/R	2	8	5	2	3	1	1	2	10	34	39	0.57	0.23	MALA A
31.40	32.00	0.60	0.60	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	1	1	7	15	23	0.10	0.04	MUY MALA
32.00	34.40	2.40	2.40	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.25	10.41666667	10.4	6	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
34.40	35.90	1.50	1.50	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0	0	10.0	6	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
35.90	37.60	1.70	1.70	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		1.1	64.70588235	64.7	35	ARCILLA	MF/R	4	13	5	2	3	1	1	2	10	41	46	1.25	0.50	REGULAR B
37.60	41.90	4.30	4.30	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.5	11.62790698	11.6	4	ARCILLA	IF/R	1	3	5	2	2	1	1	2	10	27	32	0.26	0.11	MALA B
41.90	43.10	1.20	1.20	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0	0	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	2	1	1	1	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
43.10	43.90	0.80	0.80	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	1	1	7	15	23	0.10	0.04	MUY MALA
43.90	49.00	5.10	5.10	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.55	10.78431373	10.8	4	ARCILLA	IF/R	1	3	5	2	2	1	1	2	10	27	32	0.26	0.11	MALA B
49.00	51.00	2.00	2.00	100.00	ZONA DE FALLA		0.3	15	15.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	0	1	1	0	1	1	7	15	23	0.10	0.04	MUY MALA
51.00	52.20	1.20	1.20	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0	0	10.0	6	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
52.20	53.00	0.80	0.80	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.48	60	60.0	40	ARCILLA	IF/R	4	13	8	2	4	2	1	2	10	46	51	2.18	0.87	REGULAR B
53.00	53.70	0.70	0.70	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0	0	10.0	6	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
53.70	55.00	1.30	1.30	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.55	42.30769231	42.3	40	ARCILLA	MF/R	4	8	5	2	3	1	1	2	10	36	41	0.72	0.29	MALA A
55.00	59.20	4.20	4.20	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		2.94	70	70.0	60	ARCILLA	F/R	7	13	8	2	4	2	1	2	10	49	54	3.04	1.22	REGULAR B
59.20	60.00	0.80	0.80	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.25	31.25	31.3	30	ARCILLA	MF/R	4	8	5	2	3	2	1	3	10	38	43	0.89	0.36	MALA A
60.00	62.50	2.50	2.50	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		1.75	70	70.0	60	ARCILLA	F/R	7	13	8	2	4	2	1	3	10	50	55	3.39	1.36	REGULAR B
62.50	63.45	0.95	0.95	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.2	21.05263158	21.1	24	ARCILLA	MF/R	2	3	5	2	3	1	1	2	10	29	34	0.33	0.13	MALA B
63.45	67.60	4.15	4.15	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	12	20	0.07	0.03	MUY MALA
67.60	70.30	2.70	2.70	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.8	29.62962963	29.6	24	ARCILLA	MF/R	2	8	5	2	3	1	1	2	10	34	39	0.57	0.23	MALA A
70.30	71.90	1.60	1.60	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		0.88	55	55.0	30	ARCILLA	MF/R	4	13	5	2	3	1	1	2	10	41	46	1.25	0.50	REGULAR B
71.90	74.80	2.90	2.90	100.00	SUBVOLCANICO DACTICO		2.03	70	70.0	60	ARCILLA	F/R	7	13	8	2	4	2	1	3	10	50	55	3.39	1.36	REGULAR B
74.80	76.50	1.70	1.70	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0	0	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	2	1	1	1	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
76.50	77.10	0.60	0.60	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.35	58.33333333	58.3	30	ARCILLA	IF/R	4	13	8	2	4	2	1	2	10	46	51	2.18	0.87	REGULAR B
77.10	80.00	2.90	2.90	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.15	5.172413793	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	2	1	1	1	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
80.00	83.50	3.50	3.50	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.85	24.28571429	24.3	24	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
83.50	85.10	1.60	1.60	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	1	1	7	15	23	0.10	0.04	MUY MALA
85.10	86.00	0.90	0.90	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.45	50	50.0	30	ARCILLA	MF/R	4	8	5	2	3	1	1	2	10	36	41	0.72	0.29	MALA A
86.00	90.65	4.65	4.65	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		3.5	75.3688172	75.3	40	ARCILLA	IF/R	4	17	8	2	4	2	1	2	10	50	55	3.39	1.36	REGULAR B
90.65	91.80	1.15	1.15	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.25	21.73913043	21.7	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	2	1	1	1	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
91.80	93.30	1.50	1.50	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.8	53.33333333	53.3	35	ARCILLA	F/R	4	13	8	2	3	1	1	2	10	44	49	1.74	0.70	REGULAR B
93.30	94.30	1.00	1.00	100.00	MINERAL		0.4	40	40.0	35	ARCILLA	MF/R	4	8	5	2	3	1	1	2	10	36	41	0.72	0.29	MALA A
94.30	95.40	1.10	1.10	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.2	18.18181818	18.2	20	ARCILLA	IF/R	2	3	5	2	2	1	1	2	10	28	33	0.29	0.12	MALA B
95.40	96.50	1.10	1.10	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.65	59.09090909	59.1	35	ARCILLA	IF/R	4	13	8	2	4	1	1	2	10	45	50	1.95	0.78	REGULAR B
96.50	101.20	4.70	4.70	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	0	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	12	20	0.07	0.03	MUY MALA
101.20	103.70	2.50	2.50	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.25	10	10.0	6	ARCILLA	IF/P	2	3	5	2	0	1	1	2	10	26	31	0.24	0.09	MALA B
103.70	107.50	3.80	3.80	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	13	21	0.08	0.03	MUY MALA
107.50	109.50	2.00	2.00	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	14	22	0.09	0.03	MUY MALA
109.50	110.30	0.80	0.80	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.3	37.5	37.5	24	ARCILLA	MF/P	2	8	5	2	3	1	1	1	10	33	38	0.51	0.21	MALA A
110.30	113.60	3.30	3.30	100.00	CONGLOMERADO POLIMICTICO ARGUIZADO		0.35	10.60606061	10.6	10	ARCILLA	IF/P	2	3	5	2	2	0	1	0	10	25	30	0.21	0.08	MALA B
113.60	117.20	3.60	3.60	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	13	21	0.08	0.03	MUY MALA
117.20	121.50	4.30	4.30	100.00	MINERAL		0.4	9.30232581	10.0	4	ARCILLA	IF/P	1	3	5	2	2	0	1	1	10	25	30	0.21	0.08	MALA B
121.50	128.50	7.00	7.00	100.00	ZONA DE FALLA		0	0	10.0	1	ARCILLA	IF/M/P	1	3	0	1	1	0	0	0	7	13	21	0.08	0.03	MUY MALA

Formato de logueo DDH-2585. (Fuente: Catalina Huanca Dpto. de Geomecánica)

## ANEXO C

### TABLA DE CLASIFICACION GEOMECANICA

**DATOS DE CLASIFICACION GEOMECANICA**

ZONA : NV. 2700 - MELISSA      REALIZADO POR: Daniel Cargio  
 LABOR : RP 522 - Prof      FECHA: 12/11/2023

Nº ESTACION	ORIENTACION DE LA CARA				TRAMO		VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (R.M.R.)											
	RUMBO	AZIMUT	DIR BUZ.	BUZAMIENTO	DESDE	HASTA	PARAMETRO					RANGO DE VALORES					VALORACION	
0	0	0	0	1	35	0												
TIPO DE ROCA							FREC. FRACTURA					RANGO DE VALORES					VALORACION	
ARENISCA							R. COMPRES. UNIAXIAL (Mpa)					VALOR ESTIMADO					7	
TIPO							ROD. %					VALORACION					13	
ESTRUC.							ESPACIAMIENTO (m)					VALORACION					8	
F							CONDICION DE JUNTAS					VALORACION					3	
RUMBO							RELLENO					VALORACION					1	
AZIMUT							AGUA SUBTERRANEA					VALORACION					10	
DIR BUZ.							AJUSTE POR ORIENTACION DE ESTRUCTURAS =					VALOR TOTAL RMR (valoraciones) =					51	
BUZAMIENTO							RMR					VALOR TOTAL RMR (valoraciones - Ajustes) =					44	
ESPACIAMIENTO							DESCRIPCION					CLASE DE MACIZO ROCOSO					III	
TIPO							I MUY BUENA					100 - 81					80 - 61	
ESPESOR							II BUENA					60 - 41					40 - 21	
PERSISTENCIA							III REGULAR					20 - 0					0 - 0	

GRADO	INDICE DE RESISTENCIAS IDENTIFICACION DE GAMPO	RANGO RESIS. COMP. Mpa
R1	Deleznable con golpes firmes con la punta de martillo de geólogo se desconcha con una cuhilla	1,0 - 5,0
R2	Se desconcha con dificultad con cuhilla. Marcas poco profundas en la roca con golpe firme del martillo (de punta)	5 - 25
R3	No se raya ni desconcha con cuhilla. La muestra se rompe con golpe firme del martillo	25 - 50
R4	La muestra se rompe con mas de un golpe del martillo	50 - 100
R5	Se requiere varios golpes de martillo para romper la muestra	100 - 250
R6	Solo se rompe esquinas de la muestra con el martillo	> 250

GRADO	INDICE DE INTEMPERIZACION DESCRIPCION
I SANA	Ningún signo de intemperismo en el material rocoso. Quizás lig. De coloración sobre superficies de discontinuidades principales
II LIGERO	La decoloración indica intemp. del material rocoso y superf. de disc. El material rocoso decolorado extremadamente es más débil que en su condición sana.
III MODERADA	Menos de la mitad del mat. rocoso esta descompto y/o desintegrado a un suelo la roca sana o decolorada se presenta como un marco continuo o como núcleo rocoso.
IV MUY INTEM.	Más de la mitad del mat. rocoso esta descompto y/o desintegrado a un suelo. La roca sana o decolorada se presenta como un marco discont como núcleo rocoso.
V DESCOMPU.	Todo el material rocoso esta descompto y/o desintegrado a suelo. La estructura original de la masa rocosa aun se conserve intacta.

**CORRELACION RQD vs ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES**

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA

Mín	MINERAL
Ca2	CALIZA
Con	CONGLOMERADO
Arn	ARENISCA
Bx	BRECHA
And	SUBVOLCANICO
Int	INTRUSIVO
Mrg. F	MARGA FERRUGINOSA

ABREVIACION DE TIPO DE ROCA	
Mín	MINERAL
Ca2	CALIZA
Con	CONGLOMERADO
Arn	ARENISCA
Bx	BRECHA
And	SUBVOLCANICO
Int	INTRUSIVO
Mrg. F	MARGA FERRUGINOSA

ABREVIATURAS DE TIPOS DE ESTRUCTURAS	
D	SISTEMA DE DIACLASA
Fa	SISTEMA DE FALLAS
C	CONTACTO MICRO FALLA
Est	ESTRATIFICACION
F	FRACTURAS

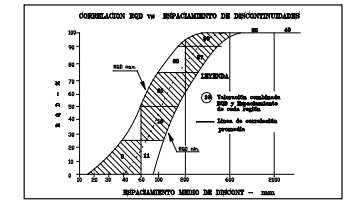
COMENTARIOS ADICIONALES	
DATA MARTILLO SCHMIDT	
[48; 46; 45; 46; 47; 45; 43; 38; 42; 44].	
RCU = 75.0 MPA	

CORRECCION POR ORIENTACION DE LAS ESTRUCTURAS	
DIRECCION PERPENDICULAR AL EJE DE LA LABOR	DIRECCION PARALELA AL EJE DE LA LABOR
EXCAVACION CON EL BUZAMIENTO	EXCAVACION EN CONTRA EL BUZAMIENTO
BUZ 45°-90° = 0	BUZ 20°-45° = -2
MUY FAVORABLE	FAVORABLE

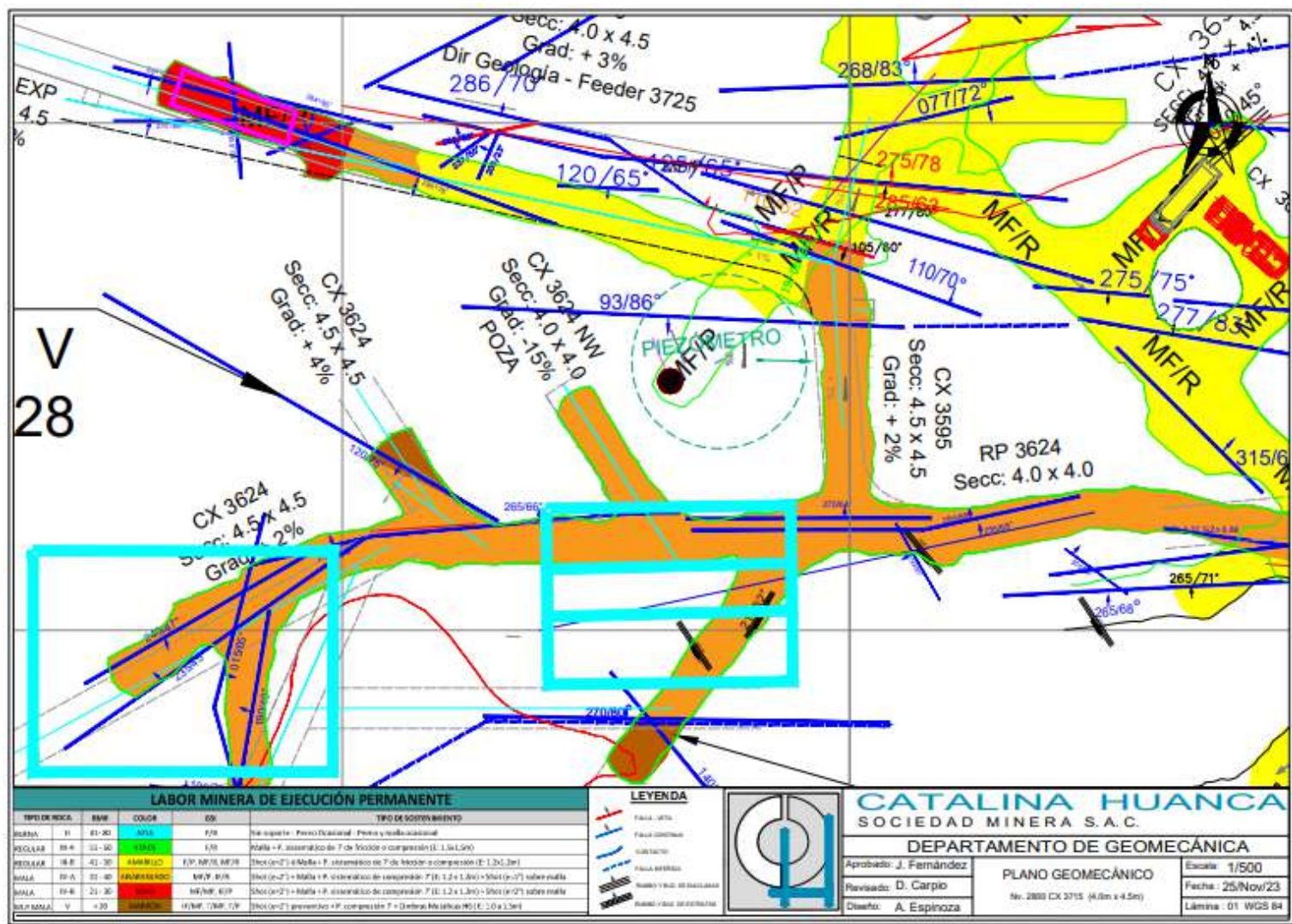
CORRECCION POR ORIENTACION DE LAS ESTRUCTURAS	
DIRECCION PERPENDICULAR AL EJE DE LA LABOR	DIRECCION PARALELA AL EJE DE LA LABOR
EXCAVACION CON EL BUZAMIENTO	EXCAVACION EN CONTRA EL BUZAMIENTO
BUZ 45°-90° = 0	BUZ 20°-45° = -12
MUY FAVORABLE	MUY DESFAVORABLE



PERPENDICULAR	
En sentido	En contra
45°-90° (-0)	45°-90° (-5)
20°-45° (-2)	20°-45° (-10)
PARALELO	
45°-90° (-12)	20°-45° (-5)
<b>R.M.R. (Ajustado)</b>	

Formato de mapeo geomecánico. (Fuente: Catalina Huanca Dpto. de Geomecánica)

## PLANO GEOMECANICO



Plano geomecánico – Nv. 2800 Cuerpo Mariela 4. (Fuente: Catalina Huanca Dpto. de Geomecánica)

## ANEXO D

### ENSAYOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS REALIZADAS POR LA CONSULTORA



Ingeniería de rocas y suelos para la Estabilidad y Seguridad de excavaciones

15

EMPRESA DEL GRUPO: GEOMECÁNICA LATINA S.A.

#### 5. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS ENSAYOS DE MECÁNICA DE ROCAS

##### 5.1 RESULTADOS DE ENSAYO DE PROPIEDADES FÍSICAS – PF

*Cuadro 4: Resultados de Ensayo de Propiedades Físicas*

ID MUESTRA	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	DENSIDAD SECA (g/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (kN/m <sup>3</sup> )	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	POROSIDAD APARENTE (%)
UDH-1709-2018	3.62	1.76	2.79	2.80	27.45	0.20	0.59
		1.77	2.81	2.82	27.62	0.39	1.13
		1.76	2.79	2.80	27.45	0.39	1.14
<b>Promedio</b>			<b>2.80</b>	<b>2.81</b>	<b>27.50</b>	<b>0.33</b>	<b>0.95</b>
UDH-1714-2018	3.62	1.78	2.66	2.69	26.34	1.02	2.76
		1.78	2.64	2.66	26.12	0.82	2.22
		1.84	2.71	2.74	26.82	0.77	2.15
<b>Promedio</b>			<b>2.67</b>	<b>2.70</b>	<b>26.43</b>	<b>0.87</b>	<b>2.37</b>
UDH1656-2018 (M1)	6.27	2.96	2.64	2.64	25.90	0.17	0.47
		2.97	2.59	2.60	25.51	0.59	1.56
		2.97	2.65	2.66	26.05	0.16	0.47
<b>Promedio</b>			<b>2.62</b>	<b>2.63</b>	<b>25.82</b>	<b>0.31</b>	<b>0.83</b>
UDH-1656-2018 (M2)	6.27	2.96	2.66	2.68	26.32	1.02	2.77
		2.97	2.66	2.68	26.28	0.65	1.78
		2.96	2.67	2.69	26.35	0.81	2.22
<b>Promedio</b>			<b>2.66</b>	<b>2.68</b>	<b>26.32</b>	<b>0.83</b>	<b>2.26</b>
UDH-1344-2016 (M1)	4.76	2.43	2.59	2.63	25.74	1.41	3.73
		2.43	2.39	2.46	24.11	2.73	6.74
		2.37	2.39	2.46	24.14	2.70	6.67
<b>Promedio</b>			<b>2.46</b>	<b>2.52</b>	<b>24.66</b>	<b>2.28</b>	<b>5.71</b>
UDH-1344-2016 (M2)	4.77	2.32	2.65	2.68	26.26	1.08	2.93
		2.35	2.60	2.63	25.83	1.27	3.37
		2.36	2.64	2.67	26.18	0.98	2.64
<b>Promedio</b>			<b>2.63</b>	<b>2.66</b>	<b>26.09</b>	<b>1.11</b>	<b>2.98</b>

*Resultados de Ensayo de Propiedades Físicas. (Fuente: DCR Ingenieros 2019 - CH)*

## ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAXIAL REALIZADA POR LA CONSULTORA



Ingeniería de rocas y suelos para la Estabilidad y Seguridad de excavaciones

16  
EMPRESA DEL GRUPO: GEOMECÁNICA LATINA S.A.

### 5.2 RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL – UCS

*Cuadro 5: Resultados de Ensayo de Resistencia a la Compresión Uniaxial*

ID MUESTRA	LITOLÓGÍA	DIÁMETRO "d" (mm)	ALTURA "h" (mm)	CARGA (KN)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL – UCS(d) (MPa)
UDH-1709-2018	CONG-PA	36.2	73.0	80.14	<b>77.87</b>
UDH-1714-2018	CONG-S	36.2	72.8	120.29	<b>116.88</b>
UDH-1685-2018	CONG.SA	36.1	72.4	63.49	<b>62.03</b>
UDH-1344-2016 (M1)	MIN en ARENS	47.6	93.8	170.52	<b>95.82</b>
UDH-1344-2016 (M2)	ARENS	47.6	94.9	87.96	<b>49.43</b>

*Resultados de Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple. (Fuente: DCR Ingenieros 2019 – CH)*



ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA CARGA PUNTUAL REALIZADAS POR LA CONSULTORA

5.7 RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA CARGA PUNTUAL – PLT

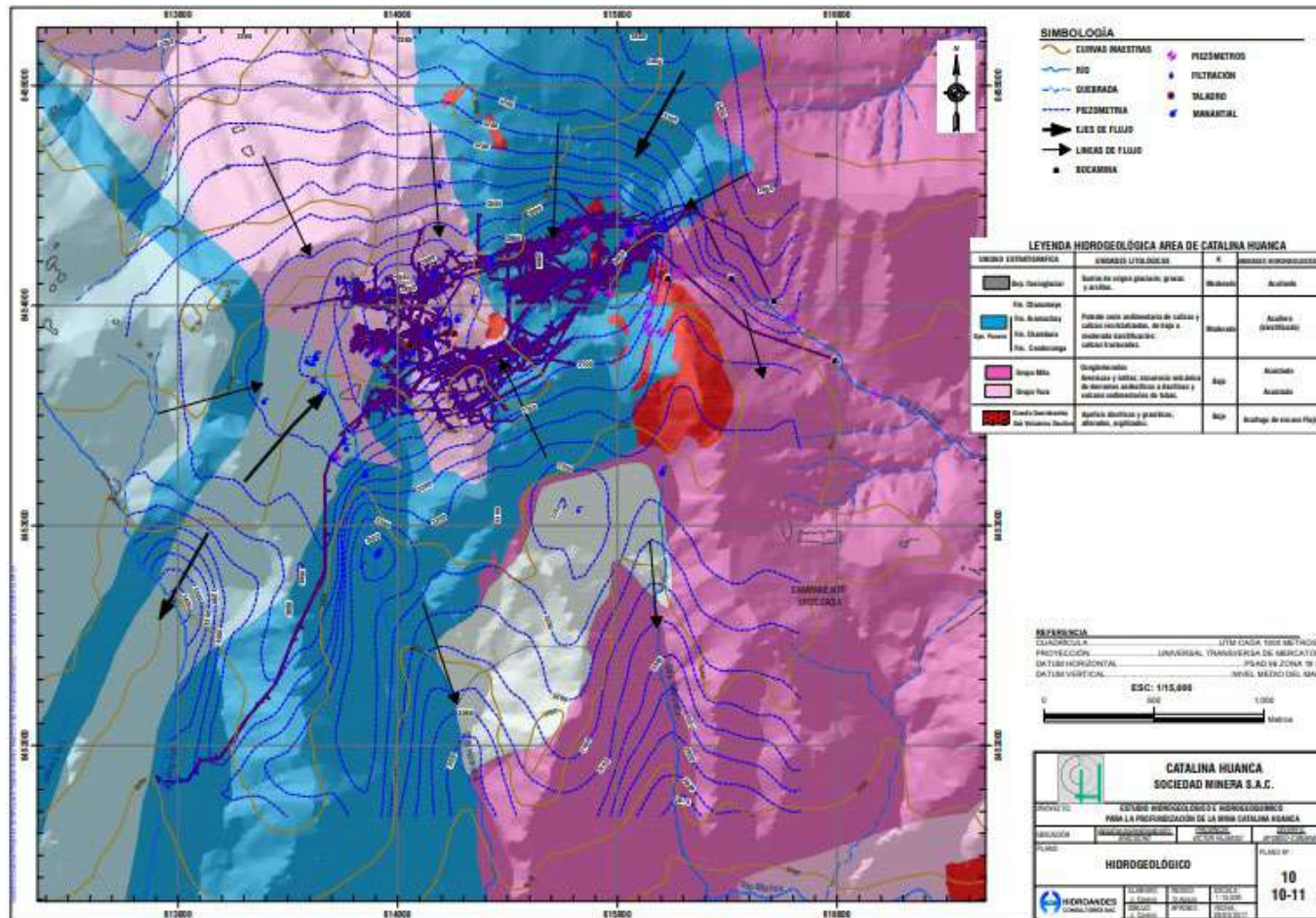
Cuadro 10: Resultados de Ensayo de Resistencia a la Carga Puntual

ID MUESTRA	LITOLOGÍA	DIÁMETRO "d" (MM)	ALTURA "h" (MM)	CARGA (kN)	Is(50)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UCS(50) (MPA)	PROMEDIO - RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UCSm(50) (MPA)
UDH-1709-2018	CONG-PA	36.2	17.8	9.98	9.47	208.27	193.35
		36.2	18.0	9.00	8.46	186.20	
		36.2	18.0	8.97	8.44	185.58	
UDH-1714-2018	CONG-S	36.2	18.7	6.10	5.57	122.53	119.98
		36.2	18.4	5.04	4.66	102.51	
		36.2	18.5	6.66	6.13	134.89	
UDH-1685-2018	CONG-SA	36.2	18.6	6.64	6.09	133.93	144.13
		36.2	18.0	7.46	7.02	154.34	
		36.2	17.3	9.52	9.23	203.11	
UDH-1656-2018 (M1)	CONG-SA-cg	62.5	31.6	11.04	4.40	96.71	78.55
		62.5	31.7	8.14	3.23	71.13	
		62.5	31.8	7.78	3.08	67.82	
UDH-1656-2018 (M2)	CONG-SA-gm	62.7	29.6	13.73	5.74	126.21	116.51
		62.7	29.8	11.48	4.77	104.98	
		62.7	29.8	12.94	5.38	118.33	
UDH-1344-2016 (M1)	MIN en ARENS	47.7	24.3	13.93	8.38	184.43	177.37
		47.7	23.2	12.41	7.74	170.31	
		47.7	24.4	7.03	4.22	92.78	

Resultados de Ensayo de Resistencia a la Carga Puntual. (Fuente: DCR Ingenieros 2019 – CH)

## ANEXO E

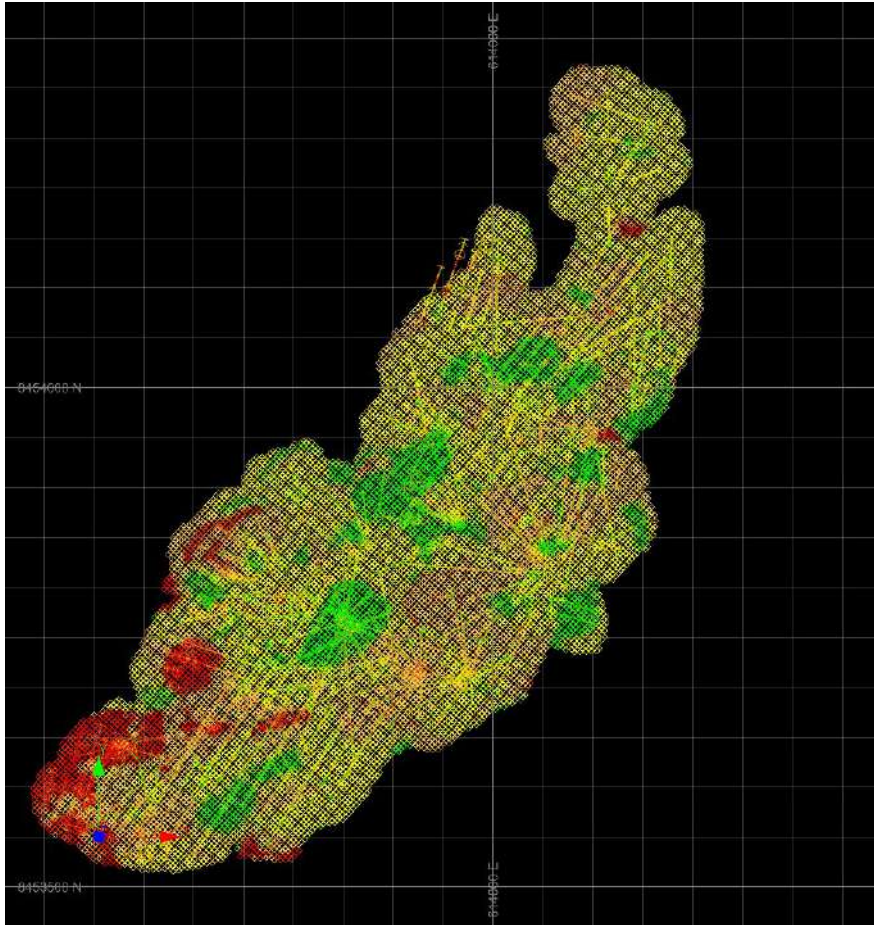
### PLANO HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD MINERA CATALINA HUANCA



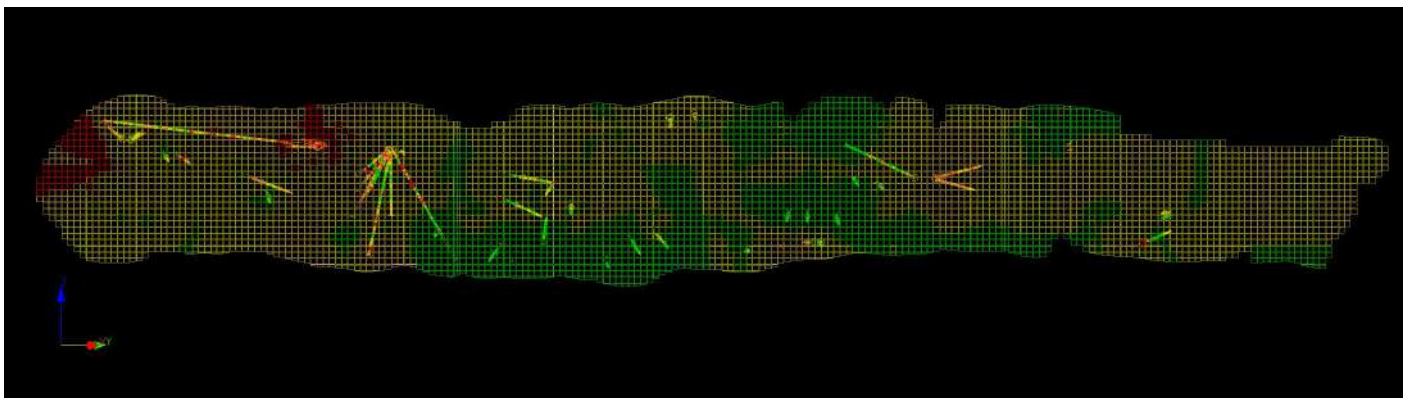
Plano Hidrogeológico de la unidad minera CH. (Fuente CIA Catalina Huanca 2021)

## ANEXO F

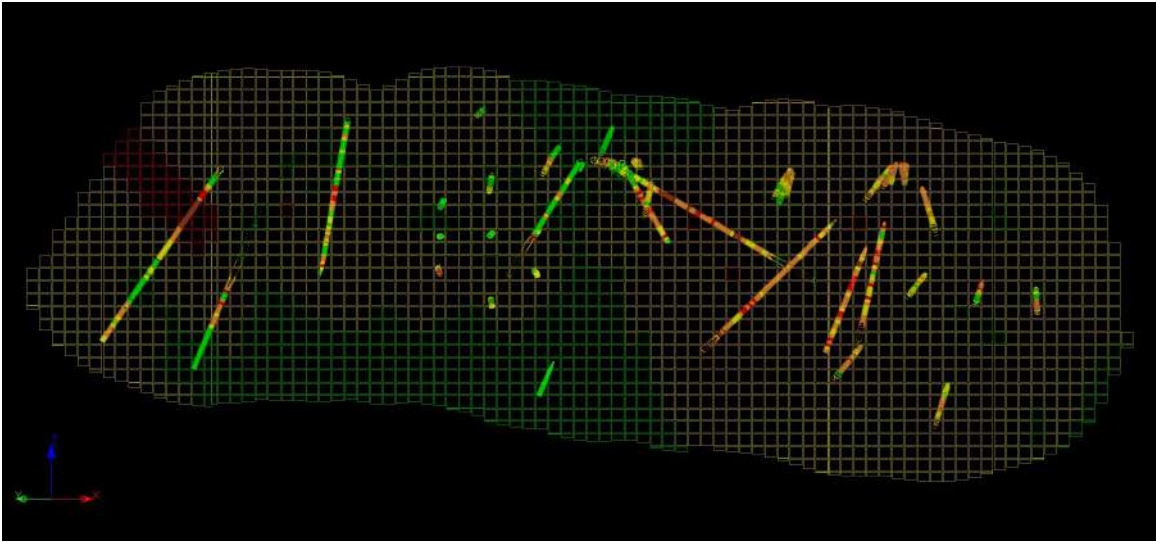
### MODELO DE BLOQUES RMR DEL CUERPO DOÑA MARIA PISO



Vista en planta (*Fuente: Propia*)

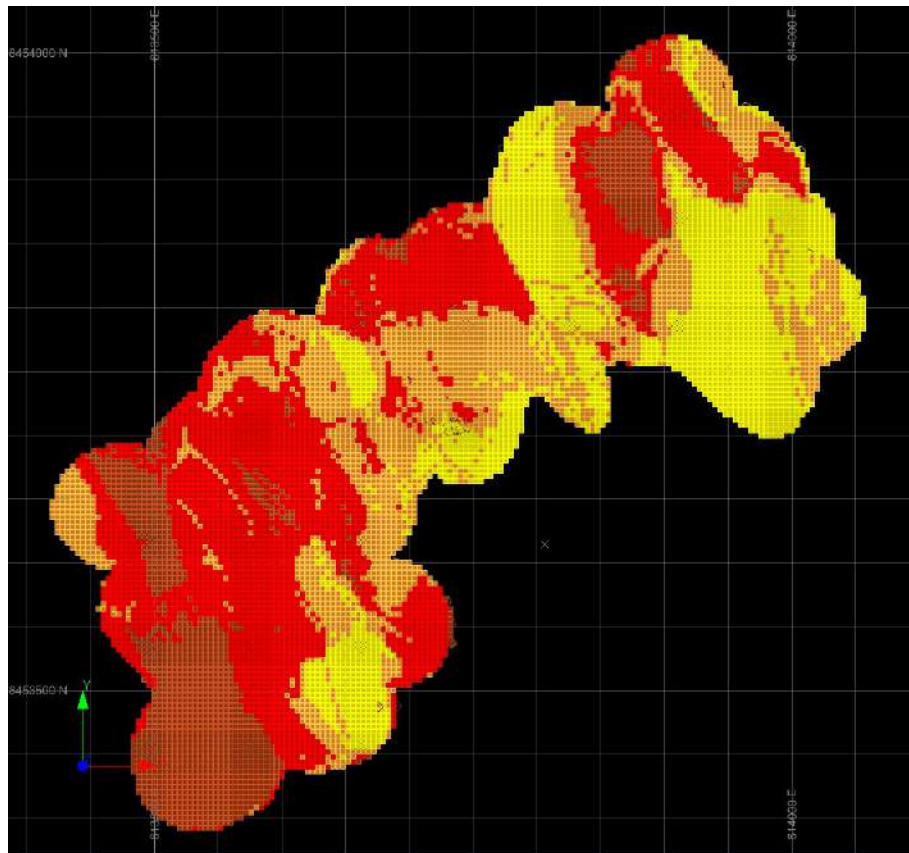


Sección SW-NE (*Fuente: Propia*)

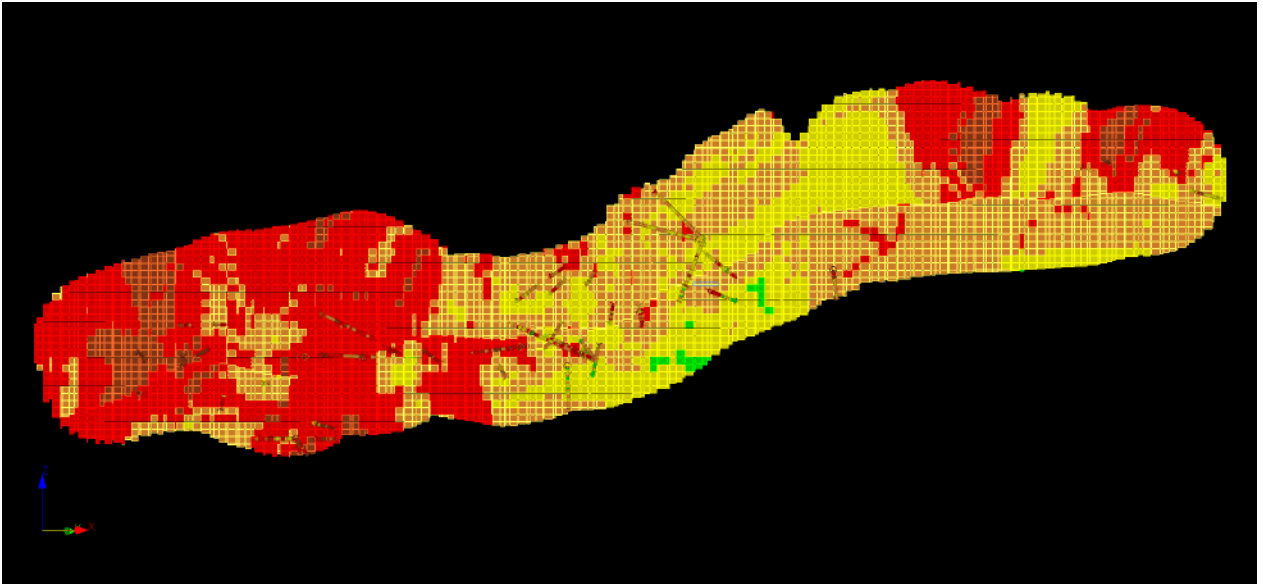


Sección E-W (*Fuente: Propia*)

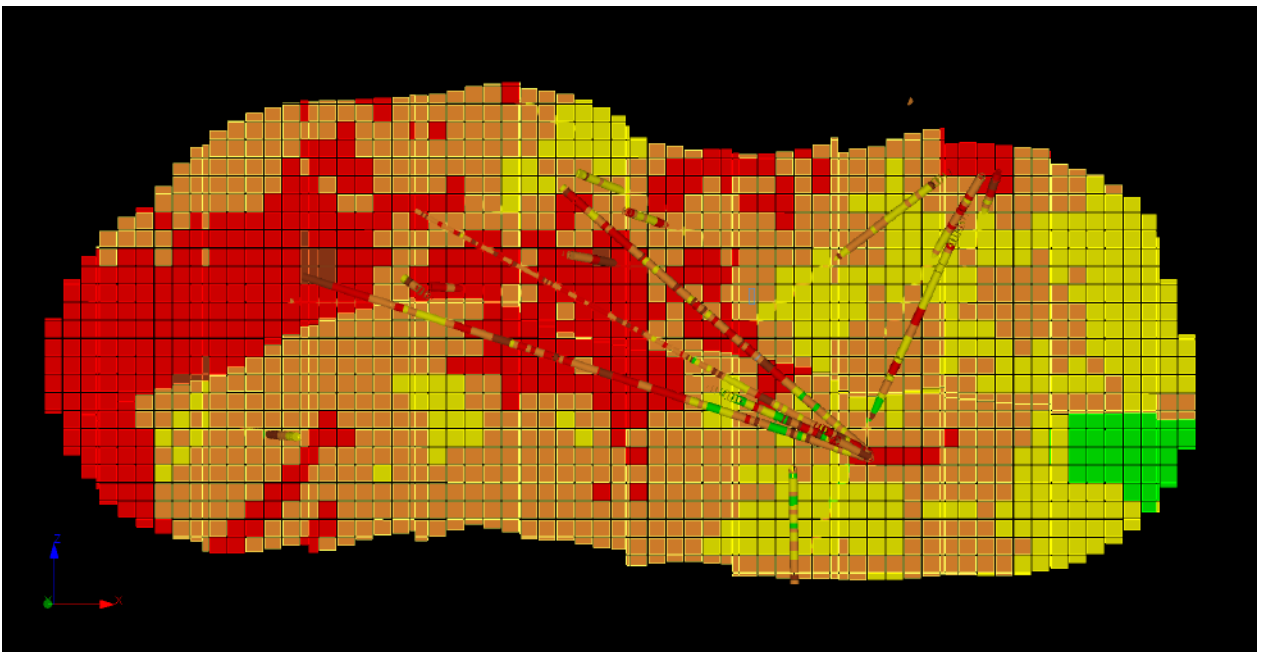
### MODELO DE BLOQUES RMR DEL CUERPO MELISSA



Vista en planta. (*Fuente: Propia*)

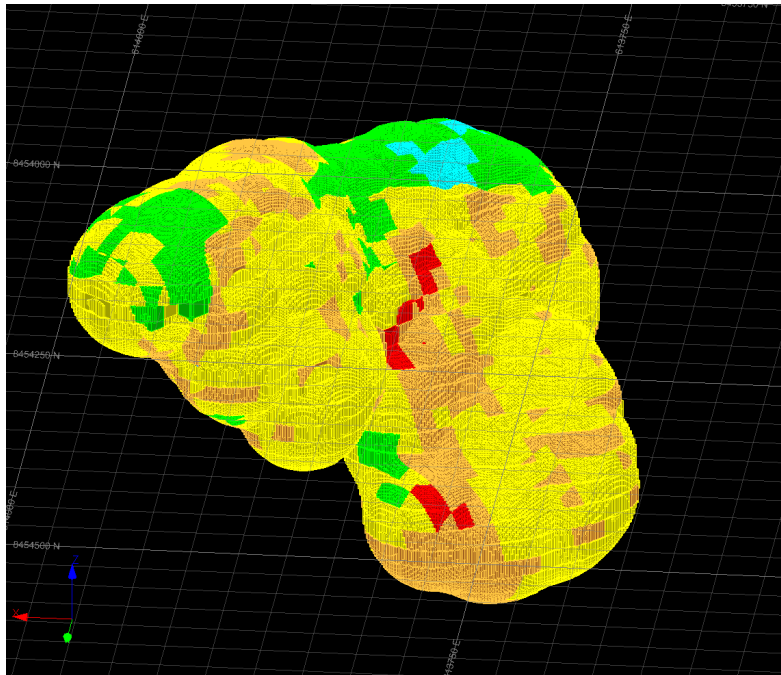


Sección SW-NE (*Fuente: Propia*)



Sección E-W (*Fuente: Propia*)

## MODELO DE BLOQUES RMR DEL CUERPO MELISSA



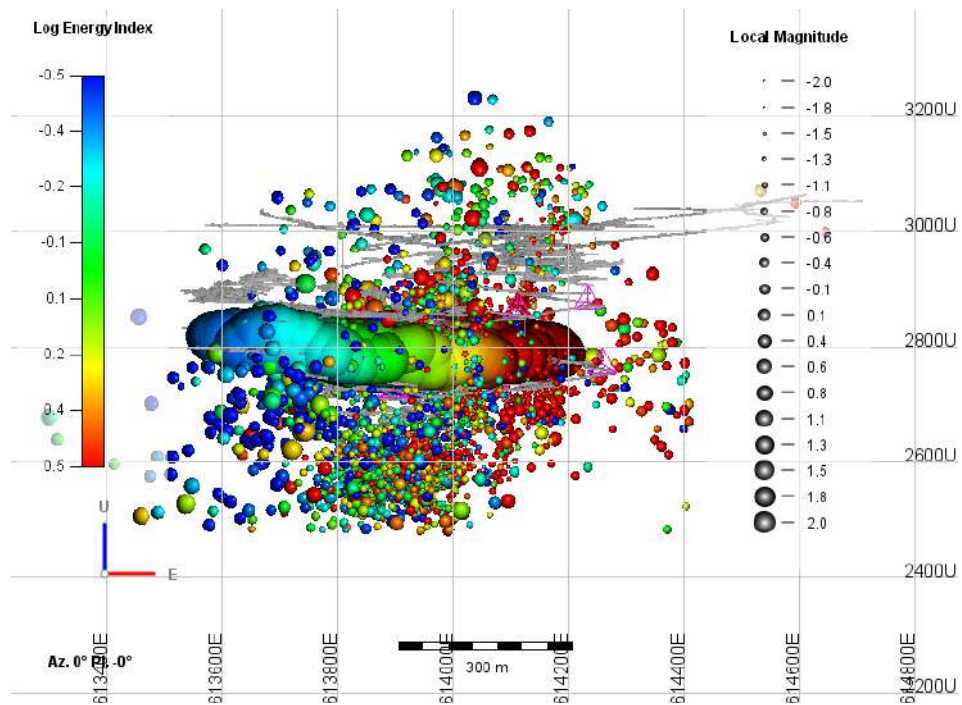
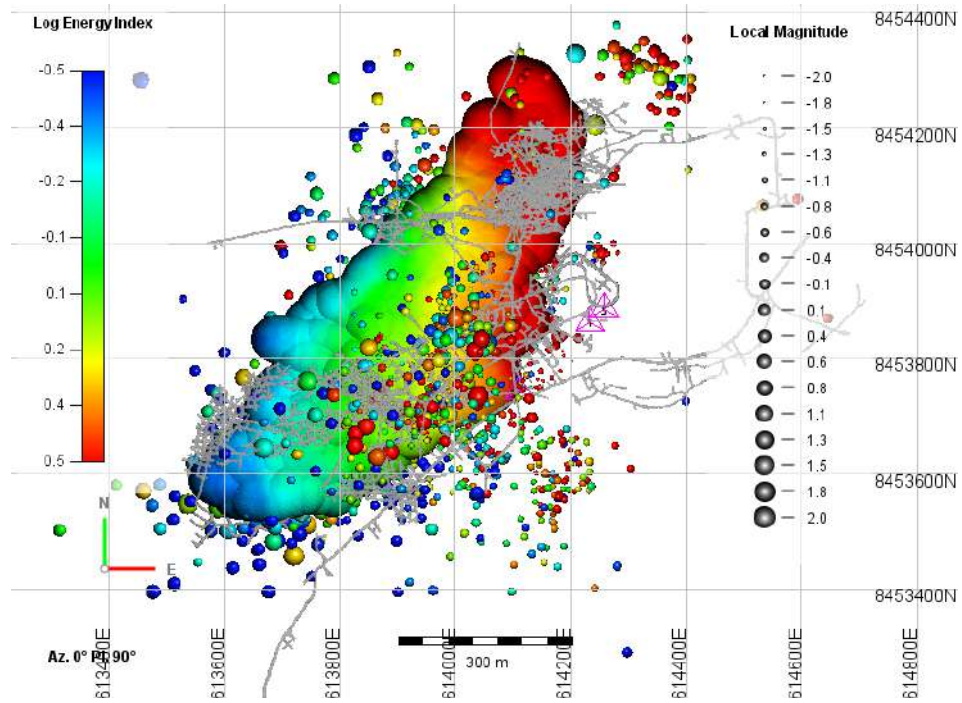
Vista 3D del Cuerpo Melissa (*Fuente: Propia*)



Sección NW-SE (*Fuente: Propia*)

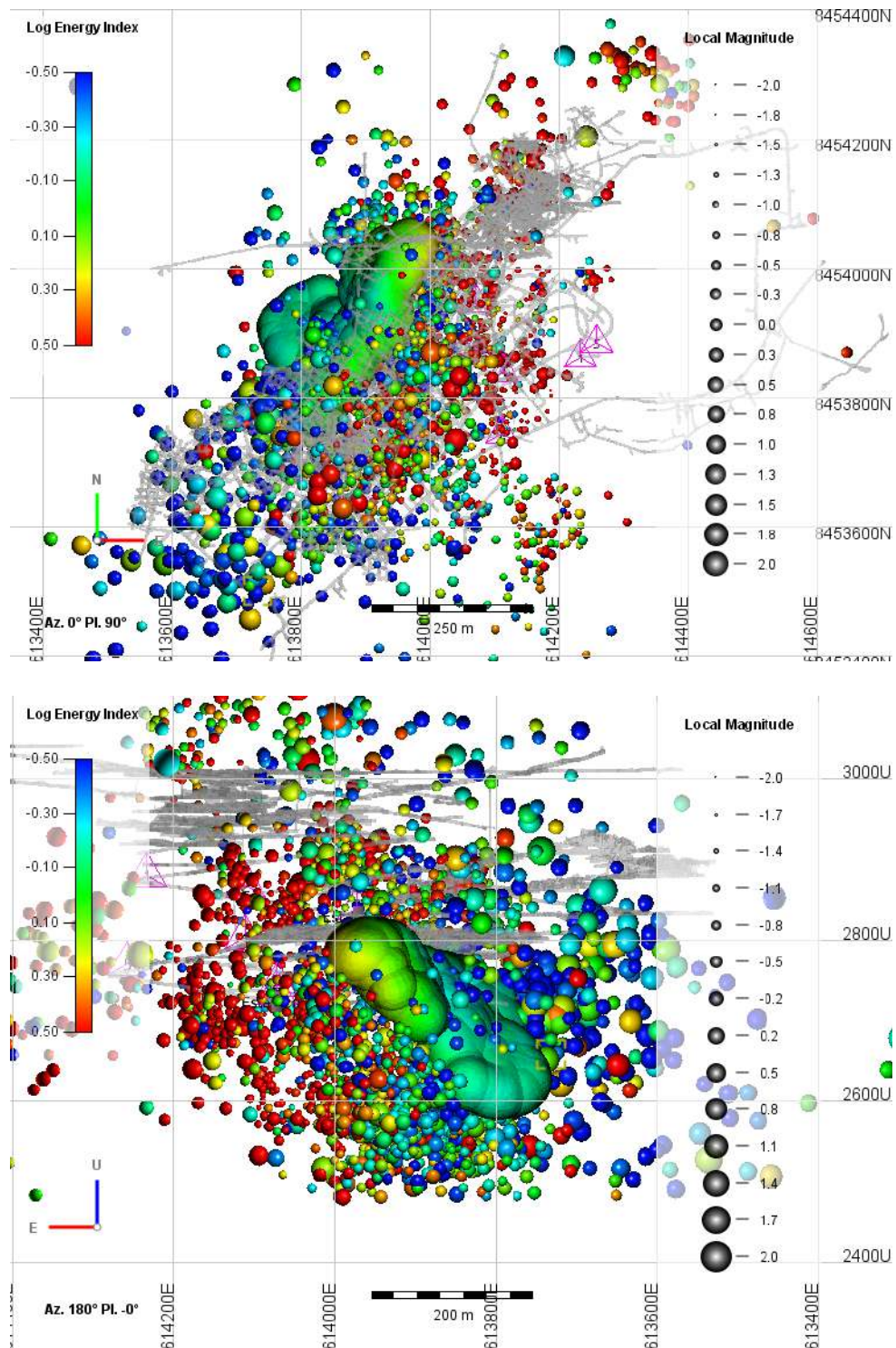
## ANEXO G

### MODELO SÍSMICO DE INDICES DE ENERGÍA DEL CUERPO DOÑA MARÍA PISO



Modelos sísmicos de índices de energía del cuerpo Doña María Piso. (Fuente: Propia)

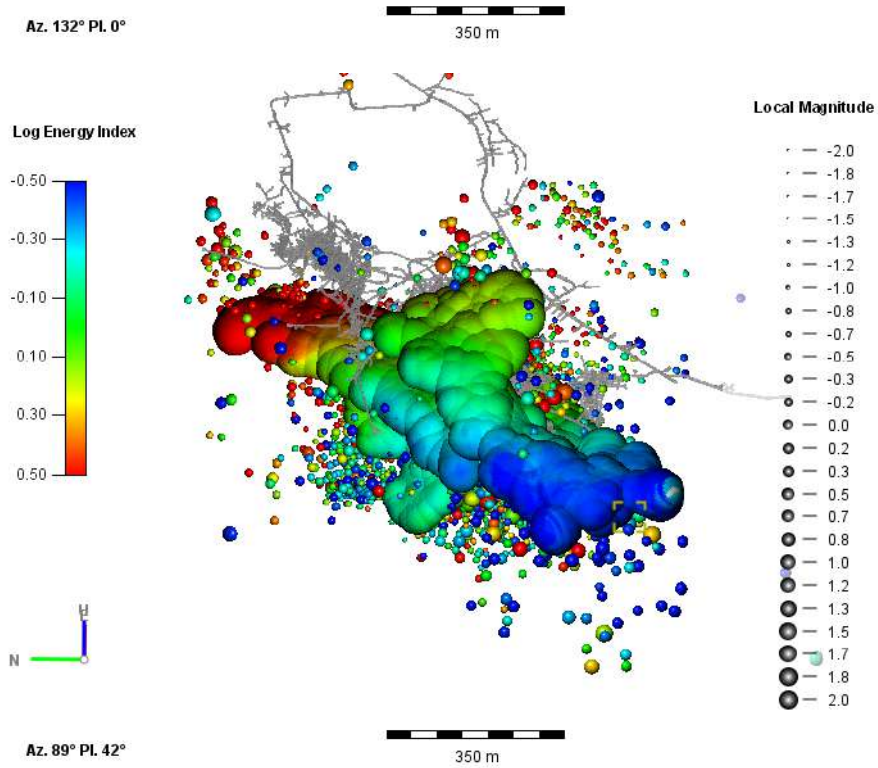
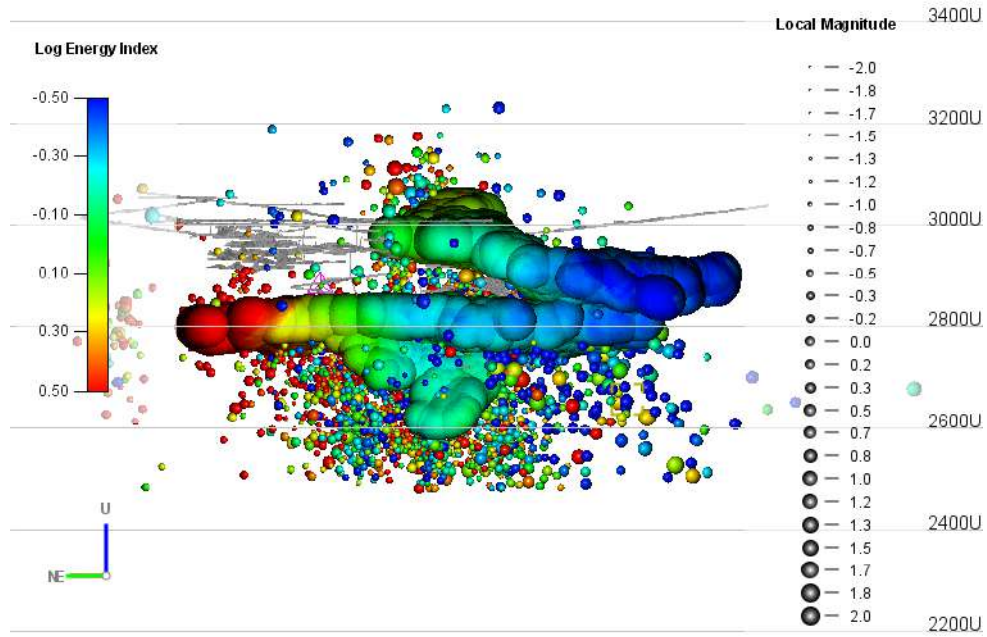
## MODELO SÍSMICO DE INDICES DE ENERGÍA DEL CUERPO MELISSA



Modelos sísmicos de índices de energía del cuerpo Melissa. (Fuente: Propia)



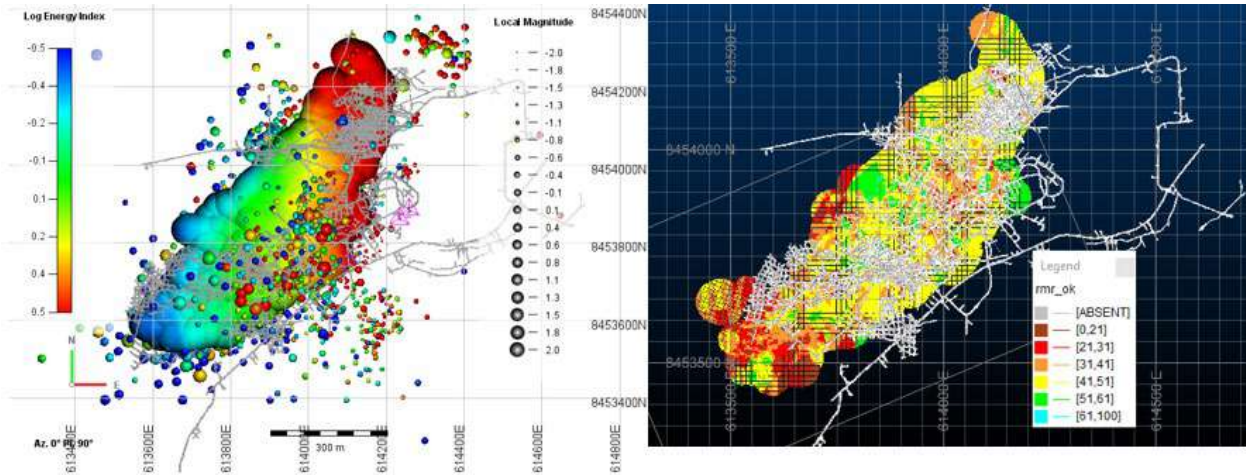
MODELO SÍSMICO DE INDICES DE ENERGÍA DE LOS CUERPOS MARIELA 4 –  
DOÑA MARIA PISO - MELISSA



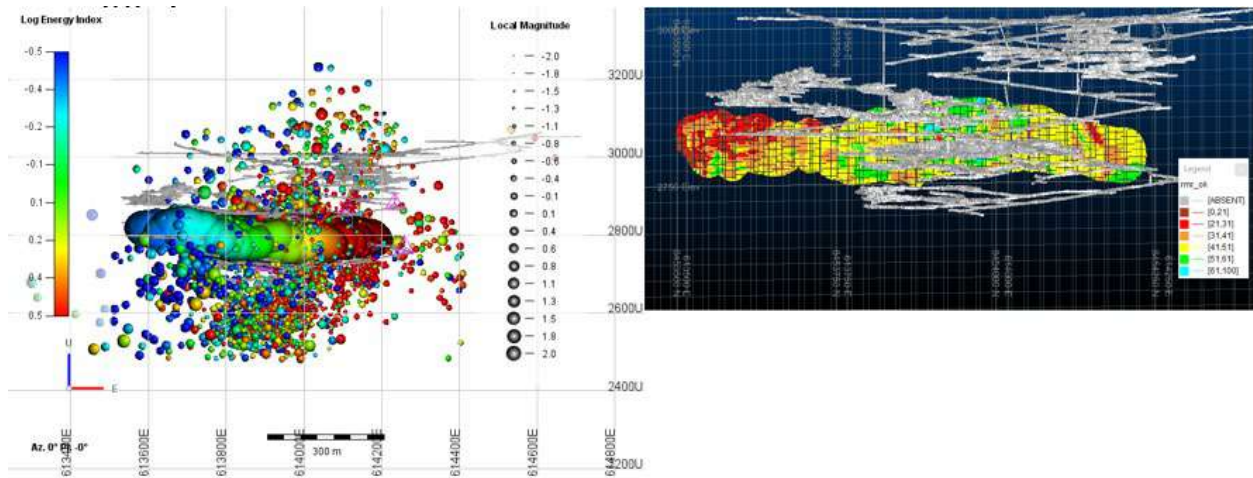
Modelos sísmicos de los cuerpos Mariela4, Doña Maria Piso y Melissa. (Fuente: Propia)

## ANEXO H

### VALIDACIÓN SÍSMICA DEL MODELO GEOMECÁNICO - DOÑA MARIA PISO

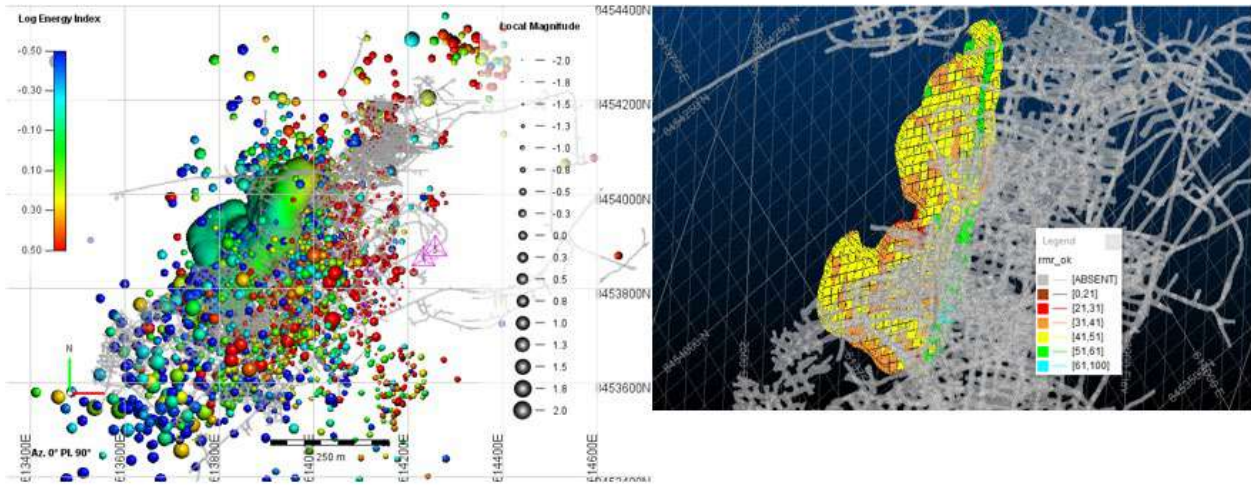


*Validación sísmica cuerpo Doña Maria Piso. (Fuente: Propia)*

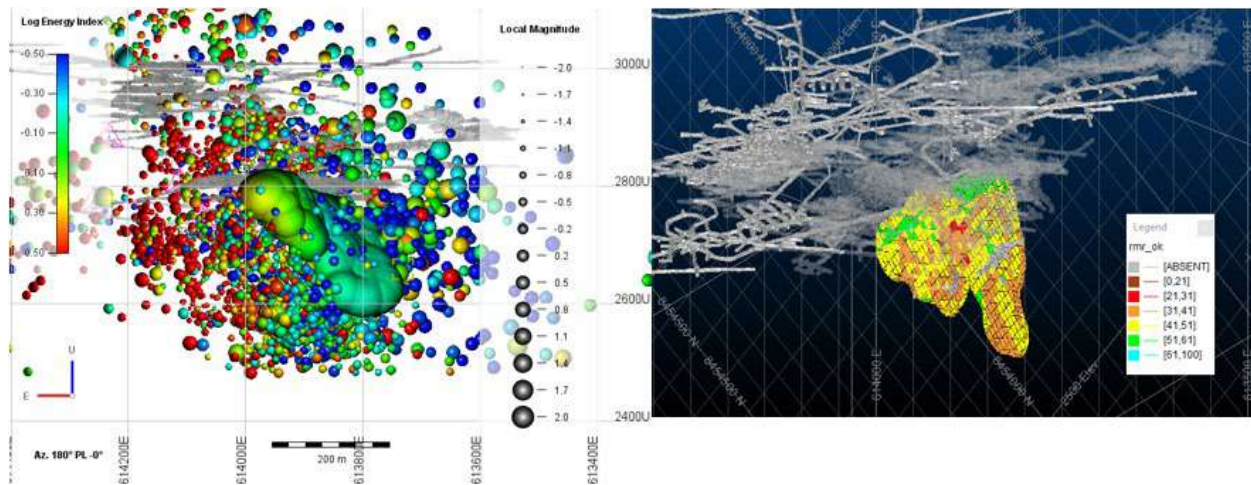


*Validación sísmica cuerpo Doña Maria Piso. (Fuente: Propia)*

## VALIDACIÓN SÍSMICA DEL MODELO GEOMECÁNICO – MELISSA



*Validación sísmica cuerpo Melissa. (Fuente: Propia)*



*Validación sísmica cuerpo Melissa. (Fuente: Propia)*

## ANEXO I

### Índice Q de Barton

Tabla 1. Puntuaciones RQD

1. Calidad de Testigo RQD		RQD (%)
A	Muy mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100
Notas:		
-Cuando se obtienen valores del RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el índice Q.		
-Los intervalos los de 5 unidades para el RQD, es decir. 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.		

*Fuente Gonzales de Vallejo (2002)*

Tabla 2. Puntuación de  $J_n$

2. Índice de Diaclasado		$J_n$
A	Roca masiva, sin diaclasar o con fisuración escasa	0.5-0.1
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20
Notas:		
-En intersecciones de túneles se utiliza la expresión: $3J_n$		
-En la boca de los túneles se utiliza la expresión: $2J_n$		

*Fuente Gonzales de Vallejo (2002)*

Tabla 3. Puntuaciones de  $J_r$

3. Índice de Rugosidad de las Discontinuidades		$J_r$
a) Contacto entre las dos caras de las discontinuidades		
b) Contacto entre las dos caras de las discontinuidades ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm.		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1.0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0.5
Notas: -Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		
c) No existe contacto entre las caras de las discontinuidades ante un desplazamiento cortante.		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1.0
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1.0
Notas: -Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m. se debe aumentar el índice $J_r$ en una unidad. -En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones. y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor $J_r = 0.5$		

*Fuente Gonzales de Vallejo (2002)*

Tabla 4. Puntuación de Ja

4. Índice de Alteración de las Discontinuidades		$\phi_r$	$J_a$
a) Contacto entre los planos de las discontinuidades (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	-	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25°-35°	1.0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2.0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3.0
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clarita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16°	4.0
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-35°	4.0
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm)	16°-24°	6.0
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8.0
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de $J_a$ depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6°-12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6.8-8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	-	5.0
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10-13 o 13-20
Nota: Los valores expresados para los parámetros $J_r$ y $J_a$ se aplican a la familia de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T \approx \sigma_n \tan^{-1} \frac{J_r}{J_a}$ )			

Fuente Gonzales de Vallejo (2002)

Tabla 5. Puntuaciones de  $J_w$

5. Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm <sup>2</sup> )	$J_w$
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 L/min, de forma localizada	< 1	1.0
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2.5	0.66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2.5-10	0.5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2.5-10	0.33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	> 10	0.2-0.1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	> 10	0.1-0.05
<p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor de <math>J_w</math>.</li> <li>-No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo.</li> </ul>			

Fuente Gonzales de Vallejo (2002)

Tabla 6. Puntuaciones del SRF

6. Condiciones tensiones de la roca		SRF		
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando				
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)	10		
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $\leq 50$ m)	5		
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $\geq 50$ m)	2.5		
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)	7.5		
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación $\leq 50$ m)	5.0		
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación $\geq 50$ m)	2.5		
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5.0		
Nota: Se reducen los valores expresados del SRF entre un 20-50% si las zonas de fracturas solo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación				
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las roca		$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_c/\sigma_\theta$	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	$> 200$	$< 0.01$	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0.01-0.3	1
K	Tensiones e levadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	$< 2$	$> 1$	200-400
Notas: -Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisótropicos cuando: $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ , disminuyendo el parámetro $\sigma_c$ hasta $0.75\sigma_c$ ; si $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , se tomara el valor $0.5\sigma_c$ . $\sigma_c$ es resistencia a la compresión simple, $\sigma_1$ y $\sigma_3$ son la tensiones principales mayor y menor y $\sigma_\theta$ es la tensión tangencial máxima, estimada a partir de la teoría de la elasticidad. -En los casos en que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del SRF entre 2.5 y 5 unidades (véase clase H).				
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas		$\sigma_\theta/\sigma_c$	SRF	
O	Presión de deformación baja	1-5	5-10	
P	Presión de detonación alta	$> 5$	10-20	

Fuente Gonzales de Vallejo (2002)



## EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS

### LOGUEO Y RELOGUEO GEOTÉCNICO DE SONDAJES





TOMA DE DATOS Y TRABAJOS GEOMECAVICOS EN INTERIOR MINA





## ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN OFICINAS

