

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA MEDIANTE LAS  
CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y DOBLE INICIACIÓN NO  
ELECTRÓNICA EN LA PERFORACIÓN Y VOLADURA DE BANCOS - U. M.  
APUMAYO S.A.C.”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. JOSE JUBEL CHOQUEÑA CCALLATA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PROMOCIÓN: 2009 - II**

**PUNO - PERÚ**

**2017**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TESIS**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA MEDIANTE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y DOBLE INICIACIÓN NO ELECTRÓNICA EN LA PERFORACIÓN Y VOLADURA DE BANCOS - U. M. APUMAYO S.A.C.”**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. JOSE JUBEL CHOQUEÑA CCALLATA**

A la Dirección de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano como requisito.

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**FECHA DE SUSTENTACION: 04 DE JULIO DEL 2017**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

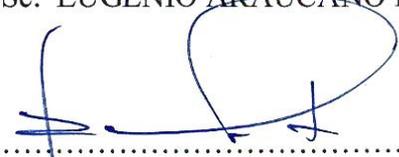
**PRESIDENTE**

:   
 .....  
**Dr. JUAN MAYHUA PALOMINO**

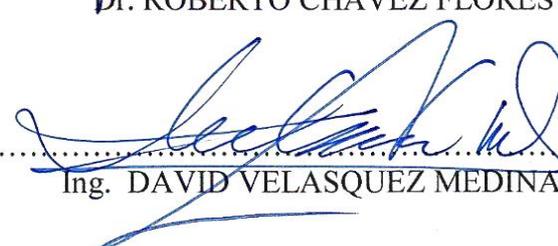
**PRIMER MIEMBRO**

:   
 .....  
**M.Sc. EUGENIO ARAUCANO DOMINGUEZ**

**SEGUNDO MIEMBRO**

:   
 .....  
**Dr. ROBERTO CHAVEZ FLORES**

**DIRECTOR DE TESIS**

:   
 .....  
**Ing. DAVID VELASQUEZ MEDINA**

**ÁREA:** Ingeniería de minas.

**TEMA:** Mecánica de rocas, geomecánica y geotecnia.

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación dedico a mis padres, Cornelio y Mercedes por su permanente apoyo en mi formación académica en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano.

Dedico a mi esposa Yanet por su aliento permanente para culminar con éxito el presente trabajo de investigación.

Dedico a mis hijos José Miguel, Camila, Yamila y hermanos y hermanas que dieron fuerza y voluntad e inspiración para ejecutar el presente trabajo de investigación.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, me dio las fuerzas para superar todas las dificultades en el trajinar en las aulas universitarias hasta culminar el presente trabajo de investigación.

Agradezco a mis padres Cornelio y Mercedes por su permanente apoyo a ellos mis profundos agradecimientos por los sacrificios que hicieron para que terminara mi carrera.

Agradezco a mis docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano.

Agradezco a Superintendente de U.M. APUMAYO S.A.C., Ing. Oliver Gago Porras.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
RESUMEN .....	21
ABSTRACT.....	22
INTRODUCCIÓN .....	23

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	26
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	27
1.2.1	Problema general.....	27
1.2.2	Problemas específicos .....	28
1.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	28
1.3.1	Objetivo general .....	28
1.3.2	Objetivos específicos.....	28
1.4	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	28
1.5	LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	29
1.6	VIABILIDAD DEL ESTUDIO .....	29

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
2.2	BASES TEÓRICAS .....	32
2.2.1	Modelo de fragmentación Kuz-Ram .....	32
2.2.2	Ecuación de Rosin Rammler .....	33
2.2.3	Ecuación de Kuznetsov.....	34
2.2.4	Las ecuaciones de Kuz-Ram.....	36
2.2.5	Estimación del índice de uniformidad .....	38
2.2.6	Estimando el factor de roca .....	39
2.2.7	Factores y equipo de perforación.....	41
2.2.8	Criterios para determinar los parámetros de la mina .....	41
2.2.9	Caracterización de la mina para el propósito de voladura .....	42
2.2.10	Fuentes de energía en los explosivos.....	43
2.2.11	Energía de choque.....	45
2.2.12	Energía de gas.....	46
2.2.13	Teoría de fragmentación de rocas.....	46
2.2.14	Cargas no confinadas.....	47
2.2.15	Cargas confinadas.....	47
2.2.16	Detonación.....	48
2.2.17	Propagación de ondas de choque.....	48
2.2.18	Expansión de gases .....	48
2.2.19	Teoría de la voladura .....	49

2.2.20	Detonación como reacción físico- químico .....	49
2.2.21	Mecanismo de fragmentación de la roca .....	50
2.3	TEORÍAS DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA.....	51
2.3.1	Teoría de la reflexión.....	51
2.3.2	Teoría de la expansión de los gases .....	52
2.3.3	Rotura por flexión.....	52
2.3.4	Teoría combinada .....	53
2.3.5	Detonación del explosivo .....	54
2.3.6	Diseño e importancia del taco en voladura de rocas.....	56
2.3.7	Cálculo de la longitud de taco .....	56
2.3.8	Mejora de la fragmentación .....	57
2.3.9	Control de la fragmentación .....	58
2.3.10	Resultados de la fragmentación .....	59
2.3.11	Tipo de secuenciamiento .....	59
2.3.12	Índice de calidad del macizo rocoso (RQD).....	62
2.3.13	Índice de la roca a la voladura (Blastibility).....	63
2.3.14	Índice de volabilidad modificado para un caso particular .....	64
2.4	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI .....	64
2.5	DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	66
2.5.1	Área de voladura.....	66
2.5.2	Agente de voladura .....	66
2.5.3	Dispositivos detonadores, no eléctricos para la voladura.....	67
2.5.4	Explosivo de voladura .....	68
2.5.5	Accesorio deflagrante .....	68
2.5.6	Explosivo detonante .....	68
2.5.7	Altos explosivos .....	68
2.5.8	Bajos explosivos .....	68
2.5.9	Mecha de seguridad .....	69
2.6	SOFTWARE WIP FRAG 2.6-VERSIÓN 2010 .....	69
2.6.1	Medición de la fragmentación .....	69
2.6.2	El método Wip frag .....	69
2.6.3	Prueba de software MRT .....	70
2.6.4	Prueba del software Video Capture Essentials (VCE) .....	71
2.6.5	Sistema operativo de Wip frag .....	71
2.6.6	Configuración básica .....	72
2.6.7	Operaciones básicas de Wip frag.....	73
2.6.8	Diálogo de Captación de imagen nueva .....	73
2.6.9	Menú de edición y herramientas.....	76
2.6.10	Editar barra de herramienta de zona de exclusión .....	76
2.6.11	Funciones básicas de barra de herramientas de zona de exclusión .....	76
2.6.12	Menú de fragmentación .....	77
2.6.13	Ajustar caja de diálogo de escala.....	78
2.6.14	Configuración de pendiente.....	78
2.6.15	Menú Wip joint.....	80
2.6.16	Herramientas gráficas de Wip frag.....	80
2.6.17	Parámetros de detección de bordes.....	80
2.6.18	Configuración de detección de bordes.....	81
2.6.19	Parámetros inteligentes.....	83
2.6.20	Configuración de detección inteligente de bordes.....	84

2.6.21	Opciones de mallas .....	85
2.7	HIPÓTESIS GENERAL.....	87
2.7.1	Hipótesis específico .....	88
2.7.2	Variable independiente .....	88
2.7.3	Variable dependiente .....	88
2.7.4	Variable interviniente .....	88

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA**

3.1	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	89
3.2	TIPO DE LA INVESTIGACIÓN.....	90
3.3	NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....	90
3.4	MÉTODO .....	90
3.5	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	91
3.5.1	Población .....	91
3.5.2	Muestra .....	91
3.5.3	Cálculo de tamaño de muestra conociendo el tamaño de la población .....	92
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	92
3.7	INDICADORES E ÍNDICES DE VARIABLES .....	92
3.8	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	94
3.8.1	Técnicas de análisis de datos .....	94
3.9	TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	94
3.9.1	Tabulación .....	94
3.9.2	Instrumentos .....	94
3.10	ASPECTOS ÉTICOS .....	95

### **CAPÍTULO IV**

#### **ASPECTOS GENERALES**

4.1	UBICACIÓN Y ACCESO DE PROYECTO APUMAYO.....	96
4.1.1	Accesibilidad al proyecto Apumayo.....	96
4.2	GEOMORFOLOGÍA .....	97
4.3	MORFOGÉNESIS.....	98
4.4	FISIOGRAFÍA .....	98
4.4.1	Colinas .....	99
4.4.2	Rasgos fisiográficos complementarios .....	100
4.4.3	Clima y zonas de vida.....	101
4.5	GEOLOGÍA.....	102
4.5.1	Geología regional .....	102
4.5.2	Geología local.....	103
4.5.3	Alteración .....	104
4.5.4	Geología estructural.....	104

4.5.5	Reservas minerales .....	105
4.5.6	Tipo de mineral.....	106
4.5.7	Estimación de reservas .....	107
4.5.8	Parámetros económicos de optimización del tajo.....	108
4.5.9	Resumen y detalle de las reservas minerales.....	109
4.6	REPORTE DE RESERVAS.....	110
4.6.1	Proceso productivo de la mina.....	111
4.7	OPERACIÓN MINA.....	111
4.7.1	Perforación.....	111
4.7.2	Voladura .....	112
4.7.3	Carguío .....	112
4.7.4	Acarreo .....	113
4.8	SERVICIOS AUXILIARES.....	114
4.8.1	Relación de equipos.....	115
4.8.2	Planta .....	115
4.8.3	Pad de lixiviación .....	116
4.8.4	Pozas.....	117
4.8.5	Producción tajo Apumayo .....	118
4.8.6	Diseño de tajo .....	118
4.8.7	Estrategias de minado.....	119
4.8.8	Programa de minado.....	120
4.8.9	Control del plan de minado .....	120
4.8.10	Botadero de desmote .....	121
4.9	PLAN DE MINADO .....	121
4.9.1	Plan de producción Apumayo 2015.....	121
4.9.2	Plan de llenado del botadero de desmote.....	122
4.9.3	Plan de monitoreo de estabilidad física de botaderos, pad y pozas .....	123

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

5.1	EXPOSICIÓN DE RESULTADOS DE ACUERDO A HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	125
5.1.1	Resultados estadísticos de acuerdo a hipótesis.....	125
5.1.2	Resultados estadísticos de acuerdo a los objetivos.....	126
5.1.3	Metodología de investigación de acuerdo a los indicadores de cada variable.....	126
5.2	EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE VARIABLES .....	127
5.2.1	Evaluación de los indicadores de la variable independiente .....	128
5.2.2	Índice RMR de Bieniawski 1989 mediante la caracterización del macizo rocoso en tajo Apumayo Sur .....	128
5.2.3	Determinación de RQD (Rock Quality Designation).....	146
5.2.4	Resistencia compresiva uniaxial (RCU).....	147
5.2.5	Evaluación geomecánica de tajo Apumayo Sur progresiva 00-23 m.....	147
5.2.6	Determinación de RMR básico de tajo Apumayo Sur .....	148
5.2.7	Perforación y voladura.....	148
5.2.8	Sistemas de iniciación en voladura.....	149
5.2.9	Detonadores ordinarios.....	149

5.2.10	Iniciación no electrónica.....	150
5.2.11	Porcentil P80 en 2014 tajo Apumayo Sur malla 3.00x3.00m en buffer y producción .....	151
5.2.12	Calidad del macizo rocoso de acuerdo a rmr 1989 en apumayo sur .....	151
5.2.13	Iniciación simple no electrónica .....	152
5.2.14	Escenario 1: Fragmentación con iniciación no electrónica y carga explosiva en voladura de producción, antes de optimización banco 4112-Proyecto 05.	153
5.2.15	Planeamiento y geología proyecto con modelo de bloques y alteración .....	153
5.2.16	Secciones analizadas y factor de seguridad .....	154
5.2.17	Factor de seguridad con software slide de Rocscience antes de la voladura.	155
5.2.18	Factor de seguridad después de la voladura .....	162
5.2.19	Resumen de factor de seguridad .....	168
5.2.20	Análisis de factor de seguridad antes la optimización de fragmentación P80	168
5.2.21	Diseño de la malla de perforación .....	168
5.2.22	Diseño de carga de voladura.....	170
5.2.23	Imagen después de la voladura .....	172
5.2.24	Análisis de fragmentación - Imagen prueba 1 .....	173
5.2.25	Análisis de fragmentación imagen prueba 2.....	175
5.2.26	Análisis de fragmentación-imagen prueba 3 .....	177
5.2.27	Resumen de análisis de fragmentación.....	179
5.2.28	Análisis de resultados de fragmentación P80 antes de optimización de fragmentación .....	180
5.2.29	Evaluación de los indicadores de la variable dependiente.....	180
5.2.30	Optimización de la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica con software Wip Frag 2010 Banco 4128- Proyecto 10 .....	181
5.2.31	Descripción de tajo Apumayo Sur (BC4128-PY10) .....	181
5.2.32	Análisis de estabilidad de taludes Sección (A-A') .....	181
5.2.33	Análisis de estabilidad con método de equilibrio límite.....	182
5.2.34	Factores de seguridad mínimos .....	182
5.2.35	Análisis de estabilidad para la situación actual: (antes de la voladura).....	183
5.2.36	Análisis de estabilidad para la situación actual (antes de la voladura).....	184
5.2.37	Resultados obtenidos para la situación actual: (después de voladura) .....	185
5.2.38	Parámetros de perforación y voladura utilizados en la voladura .....	186
5.2.39	Las alteraciones del proyecto.....	189
5.2.40	Diseño y armado de malla para la voladura por polígonos .....	190
5.2.41	Diseño de carga en el proyecto de voladura .....	191
5.2.42	El diseño de amarre para la voladura y/o secuencia de salida .....	191
5.2.43	Parámetros aplicados y resultados de la voladura .....	193
5.2.44	Análisis de fragmentación granulométrico .....	194
5.2.45	Resumen de la fragmentación.....	198
5.2.46	Interpretación de resultados.....	200
5.2.47	Topografía del banco 4128 proyecto 10 sección A-A' .....	201
5.2.48	Análisis de estabilidad Tajo Apumayo banco 4128 proyecto 10 (antes de voladura) Sección A-A' .....	203
5.2.49	Banco 4128 proyecto 10 (después de voladura).....	205
5.2.50	Escenario N°2. Aplicación de los parámetros de optimización en producción .....	207
5.2.51	Análisis de voladura .....	207
5.2.52	Planeamiento y geología del proyecto con modelo de bloques.....	208
5.2.53	Geología y alteraciones del proyecto. BC 4128 Py. 12 .....	209

5.2.54	Geotecnia el factor de seguridad: Tajo Apumayo banco 4128 proyecto 12..	210
5.2.55	Diseño de carga en voladura.....	213
5.2.56	Resultados de voladura en producción .....	214
5.2.57	Fragmentación en producción.....	215
5.2.58	Interpretaciones.....	217

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN Y APLICACIÓN

6.1	DISCUSIONES .....	219
6.2	PARÁMETROS DE PERFORACIÓN PARA PRODUCCIÓN EN MINA TOQUEPALA DE Southern Copper.....	220
6.3	PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZADOS EN LA VOLADURA TAJO APUMAYO SUR.....	221
6.4	APLICACIONES .....	222
	CONCLUSIONES .....	224
	RECOMENDACIONES.....	226
	BIBLIOGRAFÍA .....	227
	WEB GRAFÍA.....	228
	ANEXOS .....	229

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1. Ranking para el factor de roca de <i>Kuz-Ram</i> (después de <i>Cunningham</i> , 1987).....	40
Tabla 2.2. Valores de índice RQD.....	63
Tabla 2.3. Clasificación de parámetros y sus valores ( <i>Bieniawski</i> ) 1989.....	65
Tabla 2.4. Funciones básicas de <i>Wib frag</i> de barra de herramientas.....	74
Tabla 2.5. Funciones básicas de menú de herramientas de zona de exclusión.....	77
Tabla 2.6. Funciones básicas de herramientas gráficas de <i>Wip frag</i> .....	80
Tabla 3.1. Operacionalización de variables.....	93
Tabla 4.1. Vía de Acceso al área del Proyecto – Ruta 1. ....	96
Tabla 4.2. Vía de acceso al área del Proyecto – Ruta 2. ....	97
Tabla 4.3. Unidades fisiográficas presentes en el área de evaluación. ....	99
Tabla 4.4. Estaciones Meteorológicas. ....	101
Tabla 4.5. Precios de venta y recuperación metalúrgica. ....	108
Tabla 4.6. Detalle reservas por bancos - Tajo Apumayo.....	109
Tabla 4.7. Estado de reservas por bancos-Tajo Huamán Loma. ....	109
Tabla 4.8. Resumen de reservas minerales.....	110
Tabla 4.9. Histórico de reservas Tajo Apumayo. ....	110
Tabla 4.10. Transporte Mineral al Pad.....	113
Tabla 4.11. Equipo de Operaciones Mina. ....	115
Tabla 4.12. Equipo de Operaciones Auxiliares Mina.....	115
Tabla 4.13. Producción Mina – Enero 2015.....	118
Tabla 4.14. Factores de seguridad de taludes generales finales. ....	119
Tabla 4.15. Parámetros del Diseño de Tajo Apumayo y Huamán Loma. ....	119
Tabla 4.16. Plan de producción de Apumayo 2015.....	122
Tabla 4.17. Plan de llenado de botaderos Apumayo y Huamán Loma.....	123
Tabla 4.18. Frecuencias de Monitoreo Geotécnico. ....	124
Tabla 5.1. Indicadores de variable independiente. ....	128

Tabla 5.2.	Registro de discontinuidades-mapeo geomecánico de RMR de <i>Bieniawski</i> - Tajo Apumayo Sur.....	130
Tabla 5.3.	Sinopsis de registro lineal de RMR de <i>Bieniawski</i> - Tajo Apumayo Sur.....	131
Tabla 5.4.	Sinopsis de registro lineal de RMR de <i>Bieniawski</i> - Tajo Apumayo Sur.Continuación.....	132
Tabla 5.5.	Sinopsis de registro lineal de RMR de <i>Bieniawski</i> Tajo Apumayo Sur. Continuación.....	133
Tabla 5.6.	Sinopsis de registro lineal de familia 1 Tajo Apumayo Sur.....	133
Tabla 5.7.	Sinopsis de registro lineal de familia 2 Tajo Apumayo Sur.....	136
Tabla 5.8.	Sinopsis de registro lineal de familia 3 - Tajo Apumayo Sur.....	139
Tabla 5.9.	Sinopsis de registro lineal de familia 4 - Tajo Apumayo Sur.....	142
Tabla 5.10.	Resistencia compresiva de las rocas alteradas de Tajo Apumayo Sur. ...	147
Tabla 5.11.	Resumen de valor representativo de discontinuidades del registro lineal.....	147
Tabla 5.12.	Determinación de RMR básico.....	148
Tabla 5.13.	Características de macizo rocoso de andesita alterada en tajo Apumayo Sur.....	151
Tabla 5.14.	Fragmentación con iniciación simple en sílice granular, masiva y alunita, 2014.....	152
Tabla 5.15.	Factor de seguridad según los cortes.....	168
Tabla 5.16.	Fragmentación P80 prueba 1.....	175
Tabla 5.17.	Resultado de fragmentación p 80 Prueba 2.....	177
Tabla 5.18.	Resultado de fragmentación p 80 Prueba 3.....	179
Tabla 5.19.	Resumen de análisis de fragmentación P80 de tres pruebas.....	179
Tabla 5.20.	Indicadores dela variable dependiente.....	180
Tabla 5.21.	Resultados de factor de seguridad mínimo.....	183
Tabla 5.22.	Parámetros de resistencia de la masa rocosa-Tajo Apumayo Sur.....	183
Tabla 5.23.	Factor de seguridad sección A-A' antes de la voladura.....	185
Tabla 5.24.	Resultados del análisis de estabilidad con la topografía después de la voladura.....	185
Tabla 5.25.	Densidades según tipo de explosivo.....	189
Tabla 5.25.	Parámetros y resultados de voladura.....	193

Tabla 5.26. Fragmentación P80 prueba 1.....	196
Tabla 5.27. Fragmentación P80 prueba 1.....	196
Tabla 5.28. Fragmentación P80 media de prueba 1 y prueba 2.....	198
Tabla 5.29. Fragmentación con doble iniciación no electrónica, banco 4128 - Py 10 – RMR 52. ....	198
Tabla 5.30. Cálculo de P80 con Wip frag 2010 en producción.....	216

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. Diagrama de bajo explosivo reaccionando.....	44
Figura 2.2. Proceso de detonación.....	49
Figura 2.3. Desarrollo de una detonación.....	50
Figura 2.4. Modelo de flexión de la viga antes de la detonación. ....	52
Figura 2.5. Modelo de flexión de la viga después de la detonación.....	53
Figura 2.6. Orientación de tracción. ....	53
Figura 2.7. Teoría combinada: Ondas de tensión, rotura por flexión y expansión de gas.....	54
Figura 2.8. Tipos de fisuras en las proximidades del taladro. ....	55
Figura 2.9. Agrietamiento radial y rotura por reflexión de la onda de choque.....	55
Figura 2.10. Fragmentación obtenida en bloques de granito con tiempo de retardo entre taladros variable. ....	61
Figura 2.11. Línea de tendencia de la fragmentación vs. retardo entre taladros. ....	62
Figura 2.11. Imagen después de la voladura en <i>Wip frag</i> .....	70
Figura 2.12. Captura de imagen.....	71
Figura 2.13. Ventana principal de <i>Wip frag</i> . ....	72
Figura 2.14. Barras de comandos de <i>Wip frag</i> .....	73
Figura 2.15. Ventana de captura de imagen nueva.....	75
Figura 2.16. Barra de zona de exclusión.....	76
Figura 2.17. Menú de fragmentación.....	77
Figura 2.18. Ventana de determinación de escala. ....	78
Figura 2.19. Ventana de escala pendiente intercepción.....	79
Figura 2.20. Panel detector de bordes.....	81
Figura 2.21. Panel para detectar parámetros en <i>Wip frag</i> .....	83
Figura 2.22. Ventana de tamiz por defecto para malla. ....	85
Figura 4.1. Ubicación Proyecto Apumayo. ....	97
Figura 4.2. Alteración y control estructural - complejo volcánico tambillos.....	107
Figura 5.1. Histograma de espaciado de familia 1.....	134

Figura 5.2.	Histograma de persistencia de familia 1. ....	134
Figura 5.3.	Histograma de rugosidad de familia 1.....	134
	Figura 5.4. Histograma de apertura de familia 1. ....	135
Figura 5.5.	Histograma de relleno de familia 1. ....	135
Figura 5.6.	Histograma de meteorización de familia 1.....	135
Figura 5.7.	Histograma de agua subterránea de familia 1. ....	136
Figura 5.8.	Histograma de espaciado de familia 2.....	137
Figura 5.9.	Histograma de persistencia de familia 2. ....	137
Figura 5.10.	Histograma de apertura de familia 2. ....	137
Figura 5.11.	Histograma de rugosidad de familia 2.....	138
Figura 5.12.	Histograma de relleno de familia 2. ....	138
Figura 5.13.	Histograma de meteorización de familia 2.....	138
Figura 5.14.	Histograma de agua subterránea de familia 2. ....	139
Figura 5.15.	Histograma de espaciado de familia 3.....	140
Figura 5.16.	Histograma de persistencia de familia 3. ....	140
Figura 5.17.	Histograma de apertura de familia 3. ....	140
Figura 5.18.	Histograma de rugosidad de familia 3.....	141
Figura 5.19.	Histograma de relleno de familia 3. ....	141
Figura 5.20.	Histograma de meteorización de familia 3.....	141
Figura 5.21.	Histograma de agua subterránea de familia 3. ....	142
Figura 5.22.	Histograma de espaciado de familia 4.....	143
Figura 5.23.	Histograma de persistencia de familia 4. ....	143
Figura 5.24.	Histograma de apertura de familia 4. ....	143
Figura 5.25.	Histograma de rugosidad de familia 4.....	144
Figura 5.26.	Histograma de relleno de familia 4. ....	144
Figura 5.27.	Histograma de meteorización de familia 4.....	144
Figura 5.28.	Histograma de agua subterránea de familia 4. ....	145
Figura 5.29.	Densidad de polos. ....	145
Figura 5.30.	Diagrama de rosseto de U.M. Apumayo SAC. ....	146

Figura 5.31.	Detonador ordinario. ....	150
Figura 5.32.	Detonador no eléctrico. ....	151
Figura 5.33.	Fragmentación con iniciación simple en sílice granular, masiva y alunita. ....	152
Figura 5.34.	Fragmentación media con iniciación simple en 2014. ....	152
Figura 5.34a.	Proyecto de voladura para determinar la fragmentación bajo Apumayo banco 4112 PY 05. ....	153
Figura 5.35.	Modelo de bloques y zonificación geomecánica banco 4112-Proyecto 05.....	154
Figura 5.36.	Secciones en topografía de Tajo Apumayo Sur. ....	155
Figura 5.37.	Sección A-A' Factor de seguridad estático 1.448. ....	156
Figura 5.38.	Sección A-A' Factor de seguridad pseudo estático 1.075.....	157
Figura 5.39.	Sección B-B' Factor de seguridad estático 1.658. ....	158
Figura 5.40.	Sección B-B' Factor de seguridad pseudo estático 1.316. ....	159
Figura 5.41.	Sección C-C' Factor de seguridad estático 1.405. ....	160
Figura 5.42.	Sección C-C' Factor de seguridad pseudo estático 1.050. ....	161
Figura 5.43.	Sección A-A' Factor de seguridad estático 1.433.....	162
Figura 5.44.	Sección A-A' Factor de seguridad pseudo estático 1.064.....	163
Figura 5.45.	Sección B-B' Factor de seguridad estático 1.620. ....	164
Figura 5.46.	Sección B-B' Factor de seguridad pseudo estático 1.282. ....	165
Figura 5.47.	Sección C-C' Factor de seguridad estático 1.405. ....	166
Figura 5.48.	Sección C-C' Factor de seguridad pseudo estático 1.035. ....	167
Figura 5.49.	Malla de perforación. ....	169
Figura 5.50.	Diseño de amarre de banco-4112 py 05.....	170
Figura 5.51.	Simulación de voladura banco 4112-PY 05.....	171
Figura 5.51a.	Proyecto de voladura en banco 4112-PY 05.....	171
Figura 5.52.	Simulación de pre voladura banco 4112-PY 05.....	172
Figura 5.52a.	Resultado de fragmentación después de la voladura banco 4112-PY 05.....	172
Figura 5.53.	Imagen fragmentación con Wip frag voladura banco 4112-PY 05.....	173

Figura 5.54.	Simulación de fragmentación prueba 1 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	173
Figura 5.55.	Trama histográfica prueba 1 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	174
Figura 5.56.	Imagen de fragmentación en Wip frag prueba 2, banco 4112-PY 05..	175
Figura 5.57.	Simulación de fragmentación prueba 2 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	175
Figura 5.58.	Trama histografica prueba 2 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	176
Figura 5.59.	Imagen de fragmentación con Wip frag prueba 3, banco 4112-PY 05.	177
Figura 5.60.	Simulación de fragmentación prueba 3 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	177
Figura 5.61.	Trama histográfica 03 con Wip frag en banco 4112-PY 05.....	178
Figura 5.60.	Tajo Apumayo Sur Banco 4128- Proyecto 10. ....	184
Figura 5.61.	Malla de perforación optimizado precorte, buffer y producción. ....	188
Figura 5.62.	Proyecto banco 4128-10.....	189
Figura 5.63.	Malla para voladura por polígonos.....	190
Figura 5.64.	Esquema de diseño de carga en el taladro.....	191
Figura 5.65.	Diseño amarre y secuencia de salida de voladura. ....	192
Figura 5.65a.	Resultados de la voladura.....	193
Figura 5.65b.	Resultados de voldura de producción.....	194
Figura 5.66.	Imagen 02 de fragmentación con <i>Wip frag</i> 2010. ....	194
Figura 5.67.	Resultados de fragmentación P80 en <i>Wip frag</i> 2010 prueba 1. ....	195
Figura 5.68.	Imagen 02 de fragmentación con <i>Wip frag</i> 2010. ....	196
Figura 5.69.	Resultados de fragmentación P80 en <i>Wip frag</i> 2010 prueba 2. ....	197
Figura 5.70.	Fragmentación con doble en 2015-Banco 4128 - Py 10 - RMR 52. ....	199
Figura 5.71.	Fragmentación óptima,banco 4128 - Py 10 – RMR 52 P80 = 3.40. ....	199
Figura 5.72.	Sección A-A' de topografía del banco 4128 Py 10. ....	202
Figuras 5.72a.	Resultado de la voladura en banco 4128 Py 10. ....	202
Figura 5.73.	Factor de seguridad estático no drenado = 1.765.....	203
Figura 5.74.	Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.237.....	204
Figura 5.75.	Sección A-A' factor de seguridad estático no drenado =1.418.....	205
Figura 5.76.	Factor de seguridad estático no drenado = 1.046.....	206

Figura 5.76a. Voladura Tajo Apumayo Sur banco 4128 Py 12.....	207
Figura 5.77. Modelo de bloques del proyecto 12. ....	208
Figura 5.78. Calidad del macizo rocoso en función a RMR de Bieniawski.....	209
Figura 5.79. Zonificación de alteraciones en SM, SG y S.A. Proyecto 12.....	209
Figura 5.80. Sección A-A' factor de seguridad estático no drenado 1.592.....	210
Figura 5.81. Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.394.....	211
Figura 5.82. Sección B-B' factor de seguridad estático no drenado = 1.587. ....	211
Figura 5.83. Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.130.....	212
Figura 5.84. Diseño de malla de perforación.....	212
Figura 5.85. Diseño de carga de voladura de producción.....	213
Figura 5.86. Distribución de taladros de voladura.....	213
Figura 5.87. Secuencia de salida en voladura.....	214
Figura 5.87a. Zona perforaciones antes de la voladura banco 4128 – Py 12. ....	214
Figura 5.87b. Resultados de la voladura doble iniciación no electrónica en producción.....	215
Figura 5.87c. Resultado de Fragmentación con Wip frag 2010 en producción. ....	215
Figura 5.88. Imagen de fragmentación P80 con <i>Wip frag</i> 2010 en producción. ....	216
Figura 5.89. Distribución de fragmentación mediante I- Blast. ....	216

**ÍNDICE DE FOTOS**

	<b>Pág.</b>
Foto 1. Personal de voladura evaluando el resultado de voladura. ....	233
Foto 2. Personal de perforación evaluando el resultado de voladura de precorte.....	233
Foto 3. Carguío del taladro con explosivo. ....	234
Foto 4. Perforación de un taladro par el carguío con explosivo. ....	234
Foto 5. Operación de perforación para producción, buffer y precorte.....	235
Foto 6. Marcado de malla de perforación. ....	235

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	230
Anexo 2: Tablas.....	231
Anexo 3. Fotos.....	233

## RESUMEN

El proyecto Apumayo Sur se encuentra ubicado en el Departamento de Ayacucho, entre las Provincias de Lucanas, en los Distritos de Chaviña y Sancos, las operaciones mineras se realizan en Tajo Apumayo Sur, se observa la presencia de bloques de 80 cm, después de la voladura, que dificultan el proceso de carguío se requiere la reducción de tamaño de fragmentación con la aplicación de P80 con apoyo del software Wip frag 2010; por lo que era necesario optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos, los resultados de evaluación geomecánica indica el tipo de roca es andesita alterada, el RQD es 92% la roca andesita alterada es la sílice alunita, clay, propilítico, sílice granular y sílice masiva, con RCU de 23 MPa, según Bieniawski 1989 el RMR básico es 52, de calidad regular, para optimizar la fragmentación de roca considerando los parámetros indicados, se planteó el escenario 1. Las 3 pruebas de fragmentación con Wip frag 2010, el P80 es 4.03 pulgadas, 3.58 pulgadas, y 5.38 pulgadas, en el banco 4128- Proyecto 10, en macizo rocoso con RMR 52 con los parámetros de perforación y voladura en 13 pruebas el promedio de P80 de 3.405 pulgadas como tamaño óptimo de fragmentación.

**Palabras claves.** Características geomecánicas, fragmentación de roca, optimización.

## ABSTRACT

The Apumayo Sur project is located in the Department of Ayacucho, between the provinces of Lucanas, in the districts of Chaviña and Sancos, the mining operations are carried out in stope Apumayo Sur, the presence of blocks of 80 cm is observed, after the blasting, which hamper the loading process requires fragmentation size reduction with the application of P80 with support of software Wip frag 2010; so it was necessary to optimize rock fragmentation by geomechanical characteristics and double non-electronic initiation in drilling and blasting banks, results of geomechanical evaluation indicates the type of rock is andesite altered, the RQD is 92% andesite rock altered is the silica alunite, clay, propylite, granular silica and massive silica, with RCU of 23 MPa, according to Bieniawski 1989 the basic RMR is 52, of regular quality, to optimize the rock fragmentation considering the parameters indicated, scenario 1. The 3 fragmentation tests with Wip frag 2010, the P80 is 4.03 inches, 3.58 inches, and 5.38 inches, bench 4128 - Project 10, in rocky massif with RMR 52 with the parameters of drilling and blasting in 13 tests the average of P80 of 3,405 inches as the optimum size of fragmentation.

**Keywords:** Geomechanics characteristics, rock fragmentation, optimization.

## INTRODUCCIÓN

El proyecto Apumayo perteneciente a la Compañía Minera Apumayo S.A.C. se encuentra ubicado en el Departamento de Ayacucho, entre las Provincias de Lucanas, en los Distritos de Chaviña y Sancos, las operaciones mineras se realizan en el Tajo Apumayo Sur, el trabajo de investigación se titula “Optimización de la fragmentación de la roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos - U. M. Apumayo SAC”. debido a que existe un problema en la fragmentación como resultado de la voladura, se observa la presencia de bloques de rocas de dimensiones mayores que afecta seriamente en el carguío y transporte de minerales hacia la planta de recuperación se ha observado la presencia de bloques del tamaño de 40 cm, 50 cm hasta 80 cm, se ha determinado que la presencia de bolones después de la voladura es de aproximadamente de 15% a 20%, respecto al volumen total la zona de mayor presencia de bolones es en rocas con una estructura litológica regular constituidos por dos y tres familias de discontinuidades, los bolones de tamaños mayores a P80 de 10 pulgadas dificultan el proceso de carguío en vista que no llenan al volquete con el número promedio de cucharas en muchos defieren del número programado de cucharas. Con el conocimiento del problema, surge la necesidad de reducción de tamaño de fragmentación con la aplicación de P80 ¿Cómo se puede optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos apoyado para el control con el *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC. Por lo que se considera necesario realizar el trabajo de investigación con el objetivo de optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC. La posible solución a este problema son las

características geomecánicas de la masa rocosa y la doble iniciación no electrónica que nos permitirán optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos.

De acuerdo al objetivo de determinar las características geomecánicas de la masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC. la evaluación minuciosa de las discontinuidades en una progresiva de 23 m consolidados en un registro lineal, el tipo de roca es una andesita alterada, el RQD es 92% la roca andesita alterada es la sílice alunita, clay, propilítico, sílice granular y sílice masiva, estas rocas silisificadas difieren en la resistencia compresiva uniaxial cuyo promedio es 23 MPa los resultados cuantitativos, según *Bieniawski* 1989 el RMR básico es 52, mediante la evaluación de los parámetros, la andesita alterada es de categoría III, calidad regular-media,

Para optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC, se ha realizado un total de 8 pruebas de P80 en 2014 con iniciación simple no electrónica, el resultado de tamaño promedio de fragmentación P80 es de 7.9387 pulgadas que equivales a 20.164 cm, para lograr una optimización se plantea el escenario 1. Se refiere al tamaño de fragmentación con iniciación no electrónica con aplicación de *software Wip frag 2010* en proceso productivo banco 4112 Proyecto 05 en tres secciones de la topografía, el factor de seguridad estático y pseudo estático están por encima de 1.00, indica que son estables, se ha realizado 3 pruebas de determinación de la fragmentación con *Wip frag 2010*, el P80 en prueba 1 es 4.03 pulgadas, el P80 en prueba 2 es 3.58 pulgadas, el P80 en prueba 1 es 5.38 pulgadas. La optimización de fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica con *software Wip frag 2010* Banco 4128- Proyecto 10. de acuerdo a la calidad del macizo rocoso con RMR 52 y los parámetros de perforación y voladura en 13 pruebas el promedio de estas es P80 de 3.405 pulgadas como tamaño óptimo de fragmentación.

Logrado el tamaño óptimo de fragmentación de P80 DE 3.405 se planeta el escenario 2 Aplicación de los parámetros de optimización en producción en banco 4128 - Py 12 para alcanzar resultados óptimos, de manera similar considerando las calidad del macizo rocoso y los parámetros de perforación y voladura, el factor de seguridad tanto estático y Pseudo estático están por encima de 1.00 lo que indica que son estables. Con la aplicación de *software Wip frag* 2010 es 3.70 Pulgadas, los resultados indican que no se ha logrado alcanzar al valor de P80 óptimo de 3.405 sin embargo se puede consideran que existe una gran reducción de tamaño de fragmentación respecto al tamaño de fragmentación P80 con *Wip frag* 2010, en el escenario 1 el P80 que es 4.03 pulgadas, 3.58 pulgadas, 5.38 pulgadas, respectivamente.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

En la actualidad en Tajo Apumayo Sur de la Unidad Minera Apumayo S.A.C. existe un problema en la fragmentación como resultado de la voladura se observa la presencia de bloques der ocas de dimensiones mayores que afecta seriamente en el carguío y transporte de minerales hacia la planta de recuperación se ha observado la presencia de bloques de 16 pulgadas,20 pulgadas hasta 24 pulgadas, se ha determinado que la presencia de bolones después de la voladura es de aproximadamente de 15%-20% respecto al volumen total la zona de mayor presencia de bolones es en rocas con una estructura litológica regular constituidos por dos y tres familias de discontinuidades ,los bolones de tamaños mayores a P80 de 9 pulgadas dificultan el proceso de carguío en vista que no llenan al volquete con el numero promedio de cucharas en muchos defieren del número programado de cucharas y otro de los aspectos más importantes es de que los tamaños de bloques de mayores dimensiones por encima de P80 de 9 pulgadas requieren reducción de tamaño mediante un proceso adicional cuyo proceso incrementa los costos en el *pad* de recuperación metalúrgica, el problema de la

bolonería no se ha presentado en bancos de producción ubicados en la parte superior en donde la el macizo rocoso es bastante fragmentado donde la estructura litológica esta constituidos por más de tres familia de discontinuidades, con la ejecución del trabajo de investigación “Optimización de la fragmentación de la roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos”, para analizar la fragmentación se requiere del *software Wip Frag 2010*. Se evaluará las características geomecánicas del macizo rocoso en la zona de banco de producción en donde la presencia de bolones de mayores dimensiones es acentuado que dificulta el proceso de carguío y transporte de minerales, conociendo la calidad del macizo rocoso aplicando una voladura adecuada mediante doble iniciación no electrónica se puede evitar la presencia de bloques de rocas de mayores dimensiones es decir evitar la presencia de bolones con dimensiones por encima de P80 de 9 pulgadas además aplicando la doble iniciación no electrónica se lograra reducir la fragmentación de la roca en la zona de mineral sobre todo en la parte del taco del taladro en una malla de perforación adecuada, reduciendo el P80 y garantizando que el ciclo de minado sea eficiente y lograr una mayor producción de mineral y que el tamaño de voladura sea satisfactorio para el *pad* de recuperación metalúrgica.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.2.1 Problema general

¿Cómo se puede optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con el apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo se puede determinar las características geomecánicas de masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.
- ¿Cómo se puede optimizar la fragmentación de roca mediante doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con el apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.

## 1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.3.1 Objetivo general

- Optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con el apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las características geomecánicas de la masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC.
- Optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con *software Wip Frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación en la Unidad Minera Apumayo SAC. y en Minería Superficial, tiene como fin determinar las características geomecánicas del macizo rocoso y la aplicación de la doble iniciación no electrónica para reducir la fragmentación de las rocas en la zona de mineral con *software Wip Frag 2010*, ya que

es una técnica nueva de diseño de carguío en el taladro, y se va a demostrar que es necesario el uso de la doble prima en el taladro colocándose en determinadas distancias en el taladro y así aprovechar la colisión de energías que va a producir ambas primas al detonar simultáneamente y por lo tanto optimizar la fragmentación en la roca, reduciendo el P80, y mejorando en el tiempo del ciclo de carguío e incrementando la producción de mineral en la planta.

### **1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

Las limitaciones para ejecutar el presente trabajo de investigación se centran en la disponibilidad del personal de apoyo requerido con conocimiento en geomecánica y de operaciones unitarias en el método de explotación superficial y la disponibilidad de material para logística sin embargo se considera necesario subsanar estas limitaciones con una adecuada capacitación al personal que acompañarán el proceso de recolección de datos.

### **1.6 VIABILIDAD DEL ESTUDIO**

Se considera viable el proyecto de investigación planteado “Optimización la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos en Unidad Minera Apumayo SAC. Porque se trata de solución al problema de presencia de bolones en la voladura que dificulta en las operaciones unitarias de carguío y transporte además el tamaño de dimensiones mayores no es recomendable en la plata de recuperación metalúrgica principalmente en el PAD de lixiviación.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Según Hinojosa (2014), en tesis “Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto” de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, los estudios e investigaciones para poder demostrar la importancia y necesidad de colocar un iniciador con detonador electrónico más y así poder lograr optimizar la fragmentación de la roca en zona de mineral; posteriormente se realizó varias pruebas de voladura con doble iniciación electrónica, a la vez se ha modificado algunos parámetros ya establecido como el diseño de malla, el diseño de carga, y los tiempos de secuencia de salida del disparo, realizando una mejora, para lograr nuestro objetivo principal que es optimizar la fragmentación en zona de mineral usando la doble iniciación electrónica. En las pruebas de voladura con doble iniciación electrónica se obtuvo una reducción hasta un 36 % en el P80 según los análisis realizados, además de obtener una reducción en tiempo de carguío de la pala hasta un 31%.

Para Loza (2011), en tesis Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas El presente trabajo de investigación tiene por objetivo la aplicación del Método de Holmberg implicando la mayor cantidad de variables para el mejoramiento de la malla de voladura. El desarrollo del mejoramiento de la malla de voladura aplicando el método de *Holmberg* en la Minera Aurífera Retamas S.A., implica la ejecución de una investigación que involucra la cantidad máxima de variables, y las condiciones geomecánicas. Como conclusión se encontró que el desarrollo del mejoramiento de la malla de voladura en la mina Marsa permite optimizar la distribución de energía, con mucha más precisión que de manera común o empleando otros modelos matemáticos.

Según Artigas (2011), Tesis con título Diseño de patrones de perforación y voladura para normalizar la fragmentación del material resultante de la mina Choco 10 Empresa PMG S.A. de la Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería considera: El siguiente trabajo expone una propuesta para el diseño de los patrones de perforación y voladura que normalicen la fragmentación del material que actualmente es extraído en la Mina Choco 10, Mediante cálculos teóricos realizados y la evaluación de la fragmentación obtenidas en las voladuras ejecutadas en el mineral además, del modelamiento de la fragmentación, a través del Kuz Ram para la proyección de la granulometría del material (...) minimizar el área de menor influencia del explosivo y hacer más eficiente la fragmentación del material, además de estimar si es rentable este reacomodo para su aplicación.

Poma (2012), Tesis titulado Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso *Gold Mill*-Caso Minera Yanacocha de Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, en su resumen menciona: Para llegar a la solución del problema se analizan todos los procesos operativos de la mina que interviene en la

obtención del material fragmentado a la chancadora primaria de la planta *gold mil* a fin de determinar las posibles causas básicas del problema (...), en el análisis del proceso operativo se pudo determinar que la roca existe en el tajo el tapado donde provenía EL 80% de material para *gold mil* era de una roca de tipo sílice masiva de alta dureza UCS mayor a 150 MPa y que el P80 obtenido era de 14.6 cm lo cual para un proceso de lixiviación no representa mayor problema, sin embargo si afecta el *throughout* de la chancadora primaria, se trabajó en la mejora de la fragmentación del material volado aplicando teorías de voladura(roca vs explosivo).

Se trabajó en la mejora de la fragmentación del material volado aplicando teorías de voladura en incremento del *Powder Factor*, Selección de tiempos de detonación y Relación de Impedancia (Roca vs Explosivo). La aplicación de estas teorías permitió la mejora del P80 a 6.5 cm., con lo cual el *throughput* tuvo una mejora a 841 tph (sostenible), lográndose las mejoras en la Chancadora Primaria de la Planta *Gold Mill*.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 Modelo de fragmentación Kuz-Ram

El modelo Kuz-Ram presentado en esta sección es el realizado por *Cunningham* (1983) y se ha usado extensivamente alrededor del mundo. Este modelo se usa en el Sabrex de ICI entre otros módulos. Se basó en publicaciones rusas antiguas que desarrollaron una relación simple entre los parámetros de tronadura y el tamaño medio de fragmentación. Este trabajo ruso ganó considerable credibilidad del mundo occidental después que se encontró que concordaba muy estrechamente con modelos de fragmentación basados en la teoría de crecimiento de grietas. El nombre de Kuz-Ram es una abreviación de los dos principales contribuyentes a las ecuaciones que forman la base del modelo: *Kuznetsov* y *Rosin-Rammler*.

### 2.2.2 Ecuación de Rosin Rammler

La curva de Rosin-Rammler ha sido generalmente reconocida tanto en minería como en procesamiento de minerales que entrega una buena descripción de la distribución de tamaño de las rocas tronadas y trituradas. La curva se define como:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Donde R es la proporción de material retenido en un tamiz de abertura x, y  $x_c$ , es el tamaño característico y n es el índice de uniformidad descrito en la pendiente general de la curva. La ecuación de Rosin-Rammler se puede hacer lineal para facilidad de la estimación de ajuste y de parámetros:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{R}\right) = n\ln(x) - n\ln(x_c)$$

Luego, si el logaritmo natural doble del inverso de la proporción de material retenido en un tamiz de tamaño x se plotea contra el logaritmo natural del tamaño, la curva resultante debe ser lineal, con una pendiente igual al índice de uniformidad n y con una intersección igual a  $-n\ln(x_c)$ .

La importancia de los parámetros de Rosin-Rammler ( $x_c$  y n) se puede describir con referencia a 3 curvas hipotéticas de distribución de tamaño que más adelante se explica. Con referencias a las curvas A y B, se puede ver que el aumento del valor del tamaño crítico  $x_c$ , hace a la distribución de tamaño más gruesa, pero la curva permanece esencialmente paralela (si se plotea en un papel *Rosin-Rammler*, las líneas que representan estas distribuciones deben tener la misma gradiente). Variando los valores de  $x_c$ , por lo tanto, simplemente hace a la distribución de material más gruesa o más

fina. Un aumento general en la energía del explosivo (o factor de carga) al reducir el espaciamiento se debe esperar mover la curva de distribución de tamaño en esta forma para producir una pila más fina a través del rango completo de tamaño.

Con referencia a las curvas A y C, se puede ver que al aumentar el índice de uniformidad  $n$ , tiene el efecto de cambiar la pendiente de la curva. El disminuir la pendiente significa que el material se hace más grueso en el extremo superior y más fino en el inferior de la curva de distribución de tamaño. El cambiar  $n$  cambia por lo tanto el ancho de la distribución de tamaño, o la uniformidad en el tamaño de la partícula producido por la tronadura. El movimiento que tienda a producir concentraciones focalizadas de energía del explosivo, más que una distribución uniforme de energía (o sea, cambiar de un hoyo de pequeño diámetro con una columna larga de explosivo a un hoyo de gran diámetro con una columna corta de explosivo) se puede esperar que baje el  $n$  ya que la región de roca próxima a la columna corta de carga se quebrará más fina, mientras que el material adyacente a la columna larga del taco recibirá poco quebrantamiento.

### 2.2.3 Ecuación de Kuznetsov

Esta proporciona una estimación del tamaño medio de partícula de roca después de la tronadura, y es la siguiente:

$$x_{50} = A \left( \frac{V_0}{Q} \right)^{0.8} Q^{\frac{1}{6}}$$

Donde  $x_{50}$  es el tamaño medio del fragmento,  $A$  es el factor de roca,  $V_0$  es el volumen de roca quebrado por hoyo y  $Q$  es la masa de TNT que es equivalente en energía al de la carga de cada hoyo. La ecuación de *Kuznetsov*, por lo tanto, establece que el tamaño

medio de partícula de una tronadura depende de las propiedades de la roca y del explosivo.

El término  $(V_0/Q)$  representa el inverso del factor de carga equivalente. La ecuación, por lo tanto, indica que el tamaño medio de la partícula disminuye casi linealmente con el aumento del factor de carga: a medida que el factor de carga aumenta el tamaño medio de partícula disminuye. La ecuación también sugiere una débil dependencia del peso del explosivo por hoyo. Esto sugiere que la ecuación diferencia entre diámetros de hoyos grandes y pequeños. Diámetros de hoyos pequeños producirán una pila de material más fino en virtud de la distribución mejorada de energía. Por ej., un factor de carga de  $0.35 \text{ kg/m}^3$  producirá un tamaño D50 de 51.4 cm en un material con factor de roca de 10 con 120 kg de explosivo en un hoyo de 100 mm de diámetro. En comparación, el mismo factor de carga en la misma roca con 230 kg en un hoyo de 150 mm de diámetro, producirá un tamaño promedio de 57.3 cm. Este aumento en tamaño con el aumento del diámetro del hoyo (para un factor de carga y tipo de roca fijo) está de acuerdo con observaciones experimentales. Después de ajustes a la ecuación de *Kuznetsov* para permitir la expresión de la potencia en peso respecto al Anfo, la ecuación se convierte en:

$$x_{50} = A \left( \frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{\frac{1}{6}} \left( \frac{115}{E} \right)^{0.633}$$

Donde  $Q_e$  es la masa real de explosivo usada por hoyo, E es la potencia en peso relativo del explosivo (Anfo = 100%) y el término  $(115/E)$  representa un ajuste para la potencia en peso relativo del TNT respecto del Anfo.

#### 2.2.4 Las ecuaciones de Kuz-Ram

La ecuación de *Kuznetsov* proporciona una estimación del tamaño medio, o sea, el tamaño del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca. Puesto que la ecuación de *Rosin Rammler* se puede definir completamente por un punto de la curva y la pendiente de la línea *Rosin Rammler*, todo lo que se necesita después de la determinación del tamaño medio, es una estimación de  $n$  en la ecuación de *Rosin Rammler* y se puede calcular una distribución completa de tamaño de la pila. Para obtener una expresión para el cálculo de  $n$ , *Cunningham* (1983) usó la teoría moderna de fracturas para obtener una relación entre  $n$  y los siguientes factores:

- Exactitud de la perforación.
- Relación del burden al diámetro de taladro.
- Relación espaciamiento/burden.
- Relación del largo de la carga a la altura de banco.

La aplicación del modelo ha sido extensa, aplicado tanto a datos publicados como a experimentales, y en general, se ha concluido que predice muy bien los tamaños gruesos pero es menos exacto para las fracciones más finas. *Cunningham* subraya que la exactitud es más importante para la fracción gruesa (sobre tamaño) que para la fracción fina. Las ecuaciones *Kuz-Ram* posteriormente desarrolladas son:

Tamaño medio:

$$x_{50} = A \left( \frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{\frac{1}{6}} \left( \frac{115}{E} \right)^{0.633}$$

Tamaño crítico:

$$x_c = \frac{x_{50}}{0.693^{\frac{1}{n}}}$$

Índice de uniformidad:

$$n = \left[ 2.2 - 14 \frac{B}{d} \right] \left[ \frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right]^{0.5} \left[ 1 - \frac{W}{B} \right] \left[ \frac{ABS(BCL - CCL)}{L_t} + 0.1 \right]^{0.1} \frac{L_0}{H}$$

Fracción retenida:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n}$$

Donde:

$V_0/Q_e$  = El inverso de la carga específica o factor de carga (m<sup>3</sup>/kg).

$Q_e$  = Explosivo/hoyo (kg).

$E$  = Potencia en peso relativa del explosivo usado (%).

$W$  = Desviación estándar de la exactitud de perforación. (m).

$d$  = Diámetro del hoyo (mm).

$A$  = Factor de roca.

$L_0$  = Largo de la carga sobre el piso del banco (m).

$H$  = Altura del banco.

B = Burden (m).

BCL = Largo de la carga de fondo (m).

CCL = Largo de la carga de columna (m).

Lt = Largo de la carga total (CLL + BCL) (m).

### 2.2.5 Estimación del índice de uniformidad

La principal contribución de *Cunningham* al modelo *Kuz-Ram* fue el proponer un método para estimar “n” en la ecuación de *Rosin Rammler*, basado en la geometría del hoyo. La relación desarrollada por *Cunningham* se muestra en la ecuación 6.1. Examinando cada término en dicha ecuación, se revela la forma en que la geometría del hoyo afecta a n. El primer término, que involucra al burden y al diámetro del hoyo, sugiere que a medida que el burden aumenta para un diámetro fijo de hoyo, el n disminuirá (un rango más amplio de tamaño de partícula). Esto parece muy razonable. El segundo término de la ecuación de *Cunningham*, que involucra a la relación S/B, sugiere que a medida que la relación S/B aumenta n también aumenta (un rango más estrecho de tamaño de partícula). Esto está de acuerdo con el método Sueco, pero *Cunningham* precave que este término refleja la malla de perforación, no la malla de iniciación y que la relación nunca debe exceder a 2. Dentro de estas limitaciones, nuevamente es completamente razonable que la uniformidad del tamaño de partícula debe mejorarse con el aumento de la relación S/B. Los usuarios deben recordar que las tronaduras para armadura de rocas (un buen ejemplo de tamaño de partículas no uniforme) generalmente involucran relaciones S/B menores a 1.

El tercer término, que involucra a la exactitud de la perforación, sugiere que a medida que mejora, “n” mejora. Esto nuevamente parece completamente razonable. El cuarto término, que involucra el uso de la carga de fondo con explosivo de alta energía sugiere que n aumentará aumentando el largo de la carga de fondo. El uso de una carga de fondo fue propuesto por *Langefors* y *Kihlstrom* para sobrepasar el confinamiento adicional y la dificultad aumentada de fragmentación en la base de la tronadura en banco. La energía más alta en esta sección de la tronadura ayuda específicamente a mejorar la fragmentación y excavabilidad en las tronaduras. El término final en la ecuación de *Cunningham*, que involucra la relación del largo de la carga a la altura del banco, refleja la fragmentación mejorada esperada cuando la carga es distribuida uniformemente a través del banco. Diámetros grandes de hoyo conducen a cargas cortas y valores bajos para la relación largo de carga/altura del banco, conduciendo a su vez a una combinación de fragmentación gruesa en la región del collar y una fragmentación fina en la base de la carga.

#### 2.2.6 Estimando el factor de roca

El parámetro más importante en el modelo *Kuz-Ram* es el factor de roca. Los últimos desarrollos en la aplicación del modelo usan una ligera modificación al índice de tronabilidad de Lilly para calcular el factor de roca. Es interesante notar que la tabla que *Cunningham* usó para calcular el factor de roca es muy similar al índice de tronabilidad usado por Lilly (1986) con una diferencia importante, *Cunningham* le dio mayor importancia a la dureza de la roca. En flujos de lava de grano fino, en que el módulo de Young es alrededor de 80 GPa y el UCS es de alrededor de 400 MPa, la dureza es de 80, comparado con un valor máximo de 10 del índice de Lilly. El factor de roca de *Cunningham*, A, se deduce de los datos geológicos de la masa rocosa usando la ecuación:

$$A = 0.06 (RMD + JPS + JPA + RDI + HF).$$

Donde RMD es el descriptor de la masa rocosa, JPS es el espaciamiento de las diaclasas verticales, JPA es el ángulo del plano de diaclasa, RDI es la influencia de la densidad y HF es el factor de dureza. Los valores para los parámetros de la ecuación del factor de roca se muestran en la Tabla 5.1. La definición de *Cunningham* de las diaclasas está relacionada con la malla de perforación, y la definición sobre tamaño.

**Tabla 2.1.** Ranking para el factor de roca de *Kuz-Ram* (después de *Cunningham*, 1987).

Parámetro	Ranking
Descripción de la Masa Rocosa (RMD)	
Pulvulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
Espaciamiento de fracturas (JPS)	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
Angulo del plano de fractura (JPA)	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	50
Influencia de la Densidad (RDI)	$RDI = 25 * SG - 50.$
Factor de Dureza (HF)	$E/3$ para $E < 50$ GPa, $UCS/5$ para $E > 50$ GPa, E = módulo de Young, UCS = resistencia a la compresión uniaxial)

Fuente. Índice de tronabilidad - Lilly 1986.

La experiencia personal indica que la última ecuación de *Cunningham* para calcular el factor de roca sobre estima considerablemente el término. Para preservar las tendencias para estimar el término, se recomienda que la ecuación se altere simplemente cambiando el valor de la constante 0.06 a 0.04. Este cambio reduce el valor estimado del factor de roca en un tercio, produciendo, a su vez, una mejor estimación de la fragmentación que parece describir mejor el funcionamiento de la tronadura en operaciones de tronaduras en banco.

### 2.2.7 Factores y equipo de perforación

- **Altura de banco.** Está relacionado con el alcance del equipo de carguío; y en un yacimiento de oro con presencia de carbón se considera un banco de 10m.
- **Diámetro de perforación.** La capacidad de carguío de los equipos, y la resistencia a la compresión de la roca son las limitantes para elegir el diámetro de perforación. La resistencia a la compresión uní-axial de la roca oscila entre 140 y 230 MPa. Se puede ver dos opciones una broca de 200mm (7 7/8" in) y la otra de 251mm (9 7/8" in).
- **Diámetro de la barra.** Este es un elemento de mucha importancia, porque además de servir como transmisor del empuje sobre la broca, también es útil para las siguientes funciones: Se envía aire y aceite a las brocas de perforación, para obtener una mejor vida útil de este elemento y evacuar los detritus de perforación.

### 2.2.8 Criterios para determinar los parámetros de la mina

Con el objetivo de mostrar de manera iterativa el cálculo de la malla de perforación de una práctica basados en la caracterización del macizo por Lilly y el modelo matemático de *Kuz-Ram*,

Existen muchos métodos, pero los antes mencionados toman en cuenta las características geomecánicas de la roca, la litología, y nos dan un tamaño promedio de la roca fragmentada.

### 2.2.9 Caracterización de la mina para el propósito de voladura

Las características físicas de las rocas están en función a su génesis y a los procesos geológicos a los cuales fueron expuestas.

- **Propiedades de las rocas.** Densidad, resistencias dinámicas de las rocas, porosidad.
- **Caracterización del macizo rocoso.** Las propiedades del macizo rocoso son de fundamental importancia para conseguir un buen diseño de perforación y voladura pequeñas variación de estas propiedades hacen que los parámetros de diseño de la perforación y voladura sean diferentes.
- **Rigidez de la roca.** Controla la distorsión que pueda haber en las paredes del taladro.
- **Resistencia a la compresión.** controla la rotura de la roca en las paredes del taladro
- **Propiedades de atenuación.** Da la atenuación de las ondas.
- **La tensión dinámica.** Tiene su influencia en la apertura de nuevas grietas para generar fracturas de rotura en el macizo.
- **Característica, frecuencia y orientación de las fracturas in situ.** Su influencia se da en el tamaño de los bloques que se muestran de manera natural.
- **La constante A.** Es un parámetro que lo da Lilly y partir del cual se puede obtener factores de carga.
- **Propiedades mecánicas.** Se tiene dos parámetros que son susceptibles de medir.

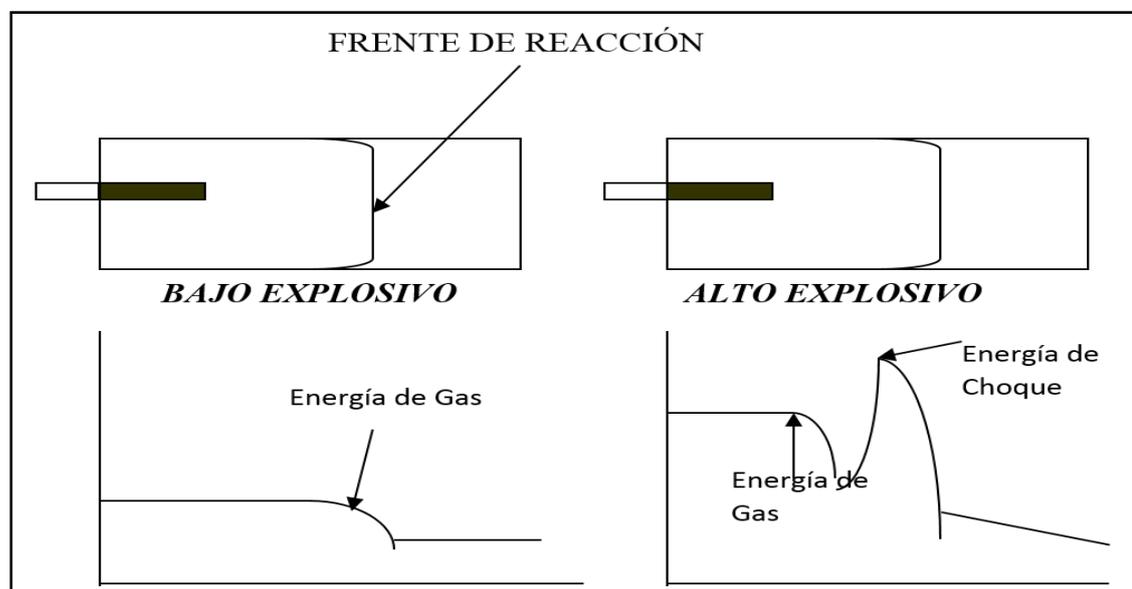
- **Módulo de Young.** Representa el comportamiento de la deformación a la tensión y tracción lineal que sufre la roca.
- **Ratio de Poisson.** Expresa la relación de la tensión lateral con la tensión longitudinal en un esfuerzo uní-axial. Los valores dinámicos se pueden calcular de la siguiente manera:

### 2.2.10 Fuentes de energía en los explosivos

Según Guzman (2010), tronadura II, Escuela de ingeniería-Centro de Ingeniera de la Pontifica universidad Católica de Chile menciona: Cuando los explosivos reaccionan químicamente, se liberan dos tipos principales de energía. El primero se llama energía de choque y el segundo, energía de gas. Ambos tipos de energía se liberan durante el proceso de detonación. El responsable de las tronaduras puede seleccionar explosivos con diferentes proporciones de energía de choque o de gas para adaptarlas a un caso en particular. Si los explosivos se usan sin confinar (tronadura secundaria), o en el corte de elementos estructurales para demolición, la selección de un explosivo con gran energía de choque es muy provechosa. Si los explosivos se usan de manera confinada dentro de un pozo de perforación, la selección de un explosivo que aporte una gran energía de gas es el indicado.

Para ayudarnos a imaginar la diferencia entre las dos energías, compararemos la reacción del alto y bajo explosivo. Los bajos explosivos son aquellos que se deflagran o queman rápidamente. Estos explosivos pueden tener velocidades de reacción de 600 a 1500 m/s y no producen energía de choque. La Figura 1.1 muestra el diagrama de un cartucho de bajo explosivo reaccionando. Suponiendo que la reacción se detuviera cuando el cartucho ha sido parcialmente consumido y se obtiene un perfil de la presión, se observa una elevación constante de la presión en el punto de reacción, hasta que

alcanza el máximo de presión. Los bajos explosivos sólo producen energía de gas durante el proceso de combustión. Al detonar un alto explosivo produce un perfil totalmente diferente.



**Figura 2.1.** Diagrama de bajo explosivo reaccionando.

Fuente. Tronadura II - Guzman V.R. (2010).

Durante la detonación de un alto explosivo, la presión de choque viaja al frente de la reacción, a través del explosivo antes de que la energía de gas sea liberada. Esta energía de choque generalmente tiene una presión mayor a la energía de gas. Una vez que la energía de choque pasa, la energía de gas se libera. Proporcionalmente la energía de gas de un explosivo detonante (alto explosivo) es mucho mayor que la energía de gas liberada por un bajo explosivo. En la figuraa de un alto explosivo, se observan dos presiones distintas y separadas. La presión de choque es una presión transitoria que viaja a la velocidad de detonación del explosivo. Se estima que esta presión sólo representa del 10% al 15% de toda la energía de trabajo disponible de un explosivo. La presión de gas equivale del 85% al 90% de la energía útil del explosivo que continúa y sigue a la energía de choque. Esta presión produce una fuerza que se mantiene constante hasta que las paredes del pozo de perforación se fisuran.

### 2.2.11 Energía de choque

Existen dos presiones distintas y separadas, resultado de la reacción de un alto explosivo y sólo una en caso de un bajo explosivo. La presión de choque es una presión transitoria que viaja a través del explosivo a la velocidad de reacción y es seguida de la presión de gas. Se cree comúnmente que la energía de choque resulta de la presión de detonación de la explosión. La presión de detonación está en función directa de la densidad del explosivo y la velocidad de detonación. Se calcula multiplicando la densidad del explosivo y la velocidad de detonación al cuadrado y es una forma de energía cinética. Hasta el momento existen varias fórmulas para calcular la presión de detonación. Como ejemplo citaremos la siguiente expresión (*Konya* 1990):

$$P = [4.5 \times 10^{-6} \times V_e^2 \times d] / [1 + 0.8 \times d]$$

Donde:

P = Presión de detonación (kbar).

D = Densidad del explosivo (g/cc).

Ve = Velocidad de detonación -VOD- (m/s).

La presión de detonación o energía de choque puede ser considerada una forma de energía cinética y su valor máximo se da en la dirección de propagación, esto significa que la presión de detonación será máxima en el extremo opuesto del cartucho al cual se inició la reacción. Es una creencia general que la presión de detonación a los lados del cartucho es prácticamente cero, ya que la onda de presión no se extiende a los lados del cartucho. Para obtener los efectos máximos de la presión de detonación de un explosivo, es necesario colocar los explosivos sobre el material que se va a tronar e iniciar la reacción del lado opuesto al que está en contacto con el material. El colocar el cartucho

de lado y dispararlo de manera que la detonación sea paralela a la superficie de material, reduce los efectos de la presión de detonación; de esta forma el material está sujeto a la presión causada por la expansión radial de los gases, una vez que la onda de detonación ha pasado.

### **2.2.12 Energía de gas**

La energía de gas liberada durante el proceso de detonación es la causa de la mayor parte de la fragmentación de la roca durante una tronadura con cargas confinadas en barrenos. La presión de gas, frecuentemente llamada presión de explosión, es la presión que los gases en expansión oponen contra las paredes del barreno después que la reacción química ha terminado. La presión de explosión resulta de la cantidad de gases liberados por unidad de peso del explosivo y de la cantidad de calor liberada durante la reacción. Entre más alta sea la temperatura producida, mayor será la presión del gas. Si se libera mayor cantidad de gas a la misma temperatura, la presión también se incrementará. Para obtener un valor rápidamente, se supone que la presión de gas es aproximadamente la mitad de la presión de detonación.

### **2.2.13 Teoría de fragmentación de rocas**

Muchas teorías han sido propuestas para mostrar como la roca se fragmenta resultado de una explosión. En general se pueden distinguir dos tipos de energía durante el proceso de fragmentación. Primero ocurre una energía de choque (ondas de esfuerzo) que se mueven por la roca a una velocidad cercana a la velocidad de onda compresional ( $V_p$ ). Después que este frente de esfuerzo ha pasado, la presión de gas (energía de gas) realiza el proceso de fragmentación de la roca. Las diferentes teorías le dan diferentes importancias a la energía de choque y/o gas en la fragmentación de rocas de acuerdo a sus experiencias particulares y pruebas realizadas. Para efectos del curso

mencionaremos una teoría (bastante aceptada) para describir el proceso de fragmentación de la roca. En general, la importancia de la energía de choque o la energía de gas dependerá de muchos factores (algunos controlables), como por ejemplo: tipo de explosivo, grado de confinamiento, parámetros de la roca, etc. Para poder tener claro que variables pueden incidir en mayor o menor grado, debemos tener claro que para todo trabajo de tronadura, existen variables controlables y variables no controlables, las cuales se detallan a continuación.

#### **2.2.14 Cargas no confinadas**

Las cargas sin confinar colocadas sobre bolones y que se detonan posteriormente producen energía de choque que se transmite en el punto de contacto entre la roca y la carga. Ya que la mayor parte de la carga no está en contacto con la roca, la mayoría de la energía útil del explosivo se dispersa al aire y se desperdicia. Este desperdicio de energía se manifiesta como un golpe de aire excesivo. La presión de gas no se puede formar ya que la carga está totalmente sin confinar, por lo tanto, la energía de gas hace poco (o nada) de trabajo. Sólo una pequeña cantidad de la energía útil del explosivo se aprovecha cuando se colocan de esta manera sobre la roca. Si comparamos dos ejemplos, uno donde la carga se coloca dentro de un pozo y posteriormente se tapa, y otro donde se coloca la carga sin confinar sobre la roca, encontraremos que se requiere muchas veces la cantidad de explosivo sobre la roca para obtener la misma fragmentación que con la carga confinada dentro del pozo.

#### **2.2.15 Cargas confinadas**

Para el caso de cargas confinadas dentro de pozos de perforación, podemos distinguir básicamente 4 eventos, en los cuales la fragmentación y desplazamiento del material ocurren durante y después de completada la detonación.

### **2.2.16 Detonación**

La detonación es el comienzo del proceso de fragmentación, los ingredientes de un explosivo (oxidantes y combustibles) bajo una detonación son convertidos en gases a alta presión y alta temperatura. En el frente de detonación pueden existir presiones del orden de 9 kbar a 275 kbar y temperaturas entre 3000 °F a 7000 °F. La presión de detonación se puede expresar en función de la densidad del explosivo y la velocidad de detonación (Konya 1990) según la fórmula presentada en la primera parte.

### **2.2.17 Propagación de ondas de choque**

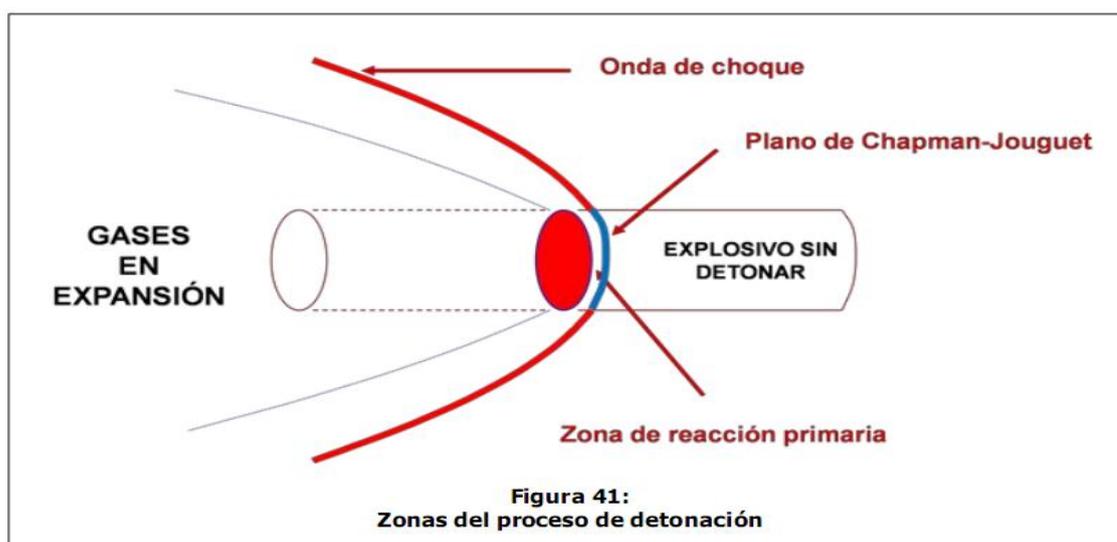
La segunda etapa, seguida a la detonación o en conjunto con la detonación, corresponde a la propagación de ondas de choque a través del macizo rocoso. La geometría o forma de estas ondas depende de muchos factores. Además, existe una pulverización alrededor del pozo que puede alcanzar rangos de 1 a 3 veces el diámetro, dependiendo de la roca y el explosivo utilizado y también la creación de fracturas alrededor del pozo dependiendo de las características de la roca y el nivel de vibraciones inducido. Es importante destacar que las ondas cuando viajan y atraviesan discontinuidades, parte de la onda se refleja y otra parte se refracta hasta alcanzar la cara libre (onda de choque reflejada).

### **2.2.18 Expansión de gases**

Durante y/o después de que la onda de choque ha pasado, la expansión de gases abre las fracturas preexistentes con una dirección predominante hacia la cara libre. La onda de choque reflejada (onda de tracción) empieza a fragmentar la roca, que en conjunto con la acción de los gases comienzan a proyectar la roca fragmentada.

### 2.2.19 Teoría de la voladura

Explosivo. Un explosivo es un compuesto químico o una mezcla de compuestos químicos a los cuales cuando se les da un estímulo correcto o incorrecto ellos sufren una reacción química violenta exotérmica (Ames L.V. Perforación y Voladura de Rocas. 2012), son compuestos químicos o mezclas susceptibles a descomposición muy rápida que generan instantáneamente gran volumen de gases a altas temperaturas y presión ocasionando efectos destructivos. Ver Figura 2.2.



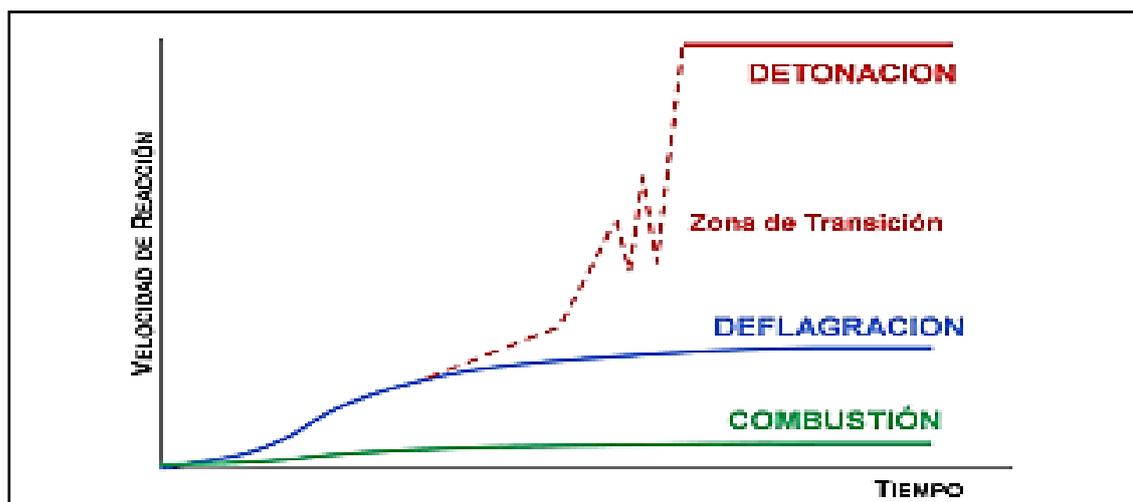
**Figura 2.2.** Proceso de detonación.

Fuente: Ames Lara, V. (2012) Tecnología de Explosivos.

### 2.2.20 Detonación como reacción físico- químico

La detonación es una reacción físico-químico exotérmica caracterizado por la velocidad de reacción del explosivo y la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva que se traduce en presión sobre el área circundante. Entonces, podemos identificar dos energías producto de la reacción del explosivo, la energía de choque y la energía de gas. La energía traducida en onda de choque, se propaga a través de la columna explosiva con suficiente energía para

activar a la masa explosiva restante provocando así una detonación en cadena. Una vez liberada la energía de choque, le sigue la energía de gas. La detonación de un explosivo se produce una gran cantidad de gases a elevada temperatura, ambas energías ejercen presión sobre el macizo rocoso circundante, la presión de choque y presión de gas, responsables de agrietar, fragmentar y desplazar al macizo rocoso. Ver Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Desarrollo de una detonación.

Fuente: Bernaola, Castilla, Herrera. (2013) Perforación y Voladura de Rocas en Minería. Madrid.

Según Konya (1998), “la presión de choque es una presión transitoria, que viaja a la velocidad de detonación del explosivo. Se estima que esta presión sólo representa del 10% al 15 % de toda la energía de trabajo disponible en un explosivo. La presión de gas equivale del 85% al 90% de la energía útil del explosivo”.

### 2.2.21 Mecanismo de fragmentación de la roca

Durante la detonación de un explosivo dentro del macizo rocoso se distinguen dos fases de acción:

- Se produce un fuerte impacto debido a la onda de choque.
- Actúan los gases a gran volumen y elevada temperatura.

Las ondas de choque se producen a causa de la detonación del explosivo confinado dentro del taladro. Ésta onda produce un efecto de compresión que se propaga a través del macizo rocoso circundante como, y al llegar a una espacio vacío (cara libre), ese esfuerzo se refracta como esfuerzo de tracción.

Según Bernaola, Castilla y Herrera (2013), “Esta primera onda de choque recorre la roca circundante a velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s” y que “la resistencia a tracción de la roca es del orden de 10 a 100 veces menor que su resistencia a compresión”, por lo tanto, éste esfuerzo de compresión y tracción hacen que el macizo rocoso se fracture alrededor del taladro.

Posterior a la onda de choque (la propagación de ondas de compresión y reflexión en ondas de tracción), los gases producto de la descomposición del explosivo se expanden a altas presión y temperatura. Los gases, hacen que las fisuras se extiendan y desplazan a la roca fragmentada.

## **2.2 TEORÍAS DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA**

### **2.3.1 Teoría de la reflexión**

Sostiene que las ondas de compresión producidas por la detonación del explosivo se propagan mediante la roca y al alcanzar una cara libre, se reflejan como ondas de tracción. Las ondas de compresión agrietan mínimamente a la roca, mientras las ondas de tracción son las mayores responsables de la fragmentación y el desplazamiento del material.

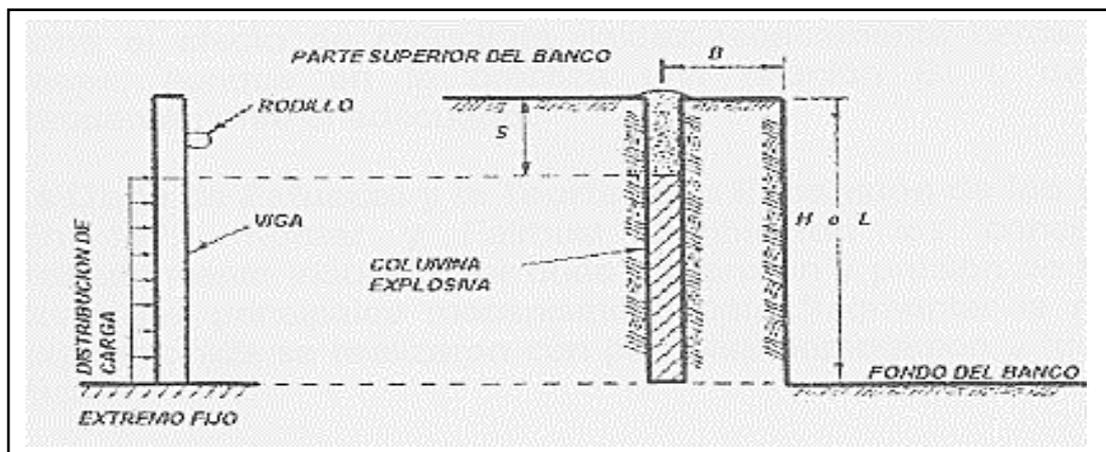
### 2.3.2 Teoría de la expansión de los gases

Son dos puntos que destaca esta teoría producidos por la presión de los gases en expansión. Primero, las grietas se inician a una distancia de 2 taladros radiales fuera del taladro y estas grietas se extienden hacia el centro del taladro y hacia la cara libre.

Segundo, el desplazamiento del material fragmentado, por la acción de los gases en gran volumen, se da una vez que las grietas llegan a la cara libre.

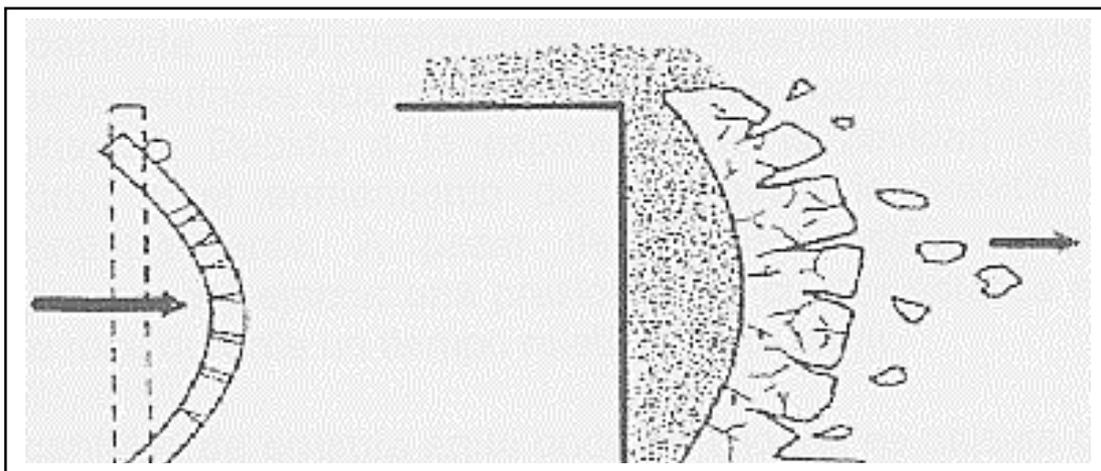
### 2.3.3 Rotura por flexión

La rotura por flexión se explica tratando a la roca como una viga rectangular que se trata doblar o quebrarlo. La presión de taladro por un pequeño intervalo de tiempo. Mientras que la presión de gas se sostiene más largamente y es el encargado del 90% de la energía para fragmentar a la roca. Ver Figura 2.4, 2.5 y 2.6



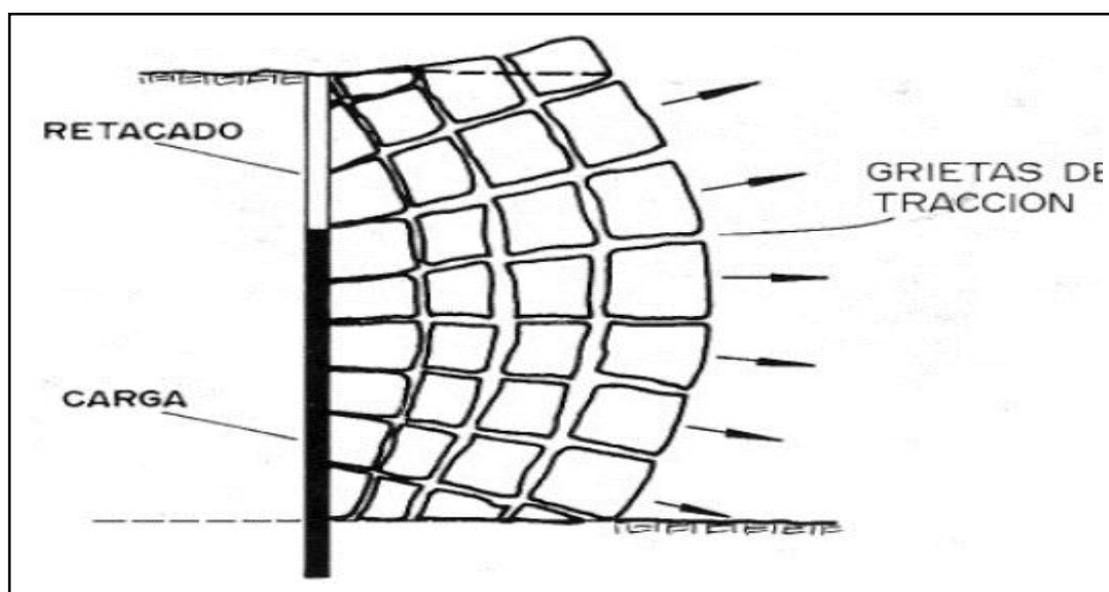
**Figura 2.4.** Modelo de flexión de la viga antes de la detonación.

Fuente: Perforación y Voladura de Rocas I- Ames Lara, V. (2012)



**Figura 2.5.** Modelo de flexión de la viga después de la detonación.

Fuente: Perforación y Voladura de Rocas I - Ames Lara, V. (2012).



**Figura 2.6.** Orientación de tracción.

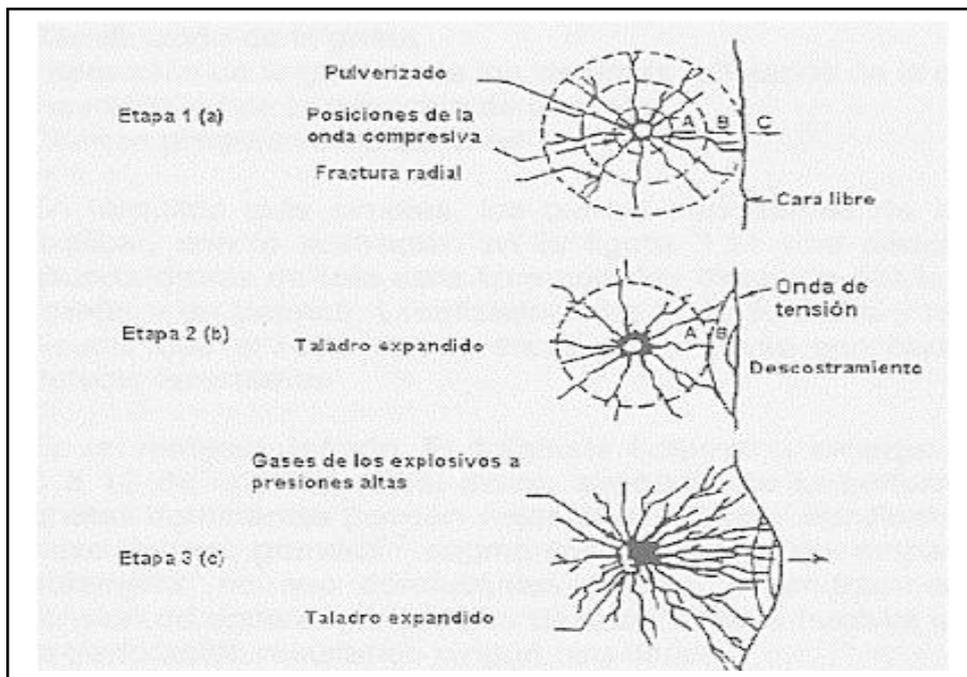
Fuente. Perforación y Voladura de Rocas I - Ames Lara, V. (2012).

### 2.3.4 Teoría combinada

Combina las teorías antes vistas en tres etapas. Ver Figura 2.7.

- Primero, el explosivo detona ya la alta presión de taladro agrieta el área adyacente del taladro.

- Segundo, las ondas de compresión al alcanzar una cara libre se refleja en ondas de tensión.
- Tercero, La presión de los gases en expansión amplía las grietas primarias y desplazan al material fragmentado.



**Figura 2.7.** Teoría combinada: Ondas de tensión, rotura por flexión y expansión de gas.

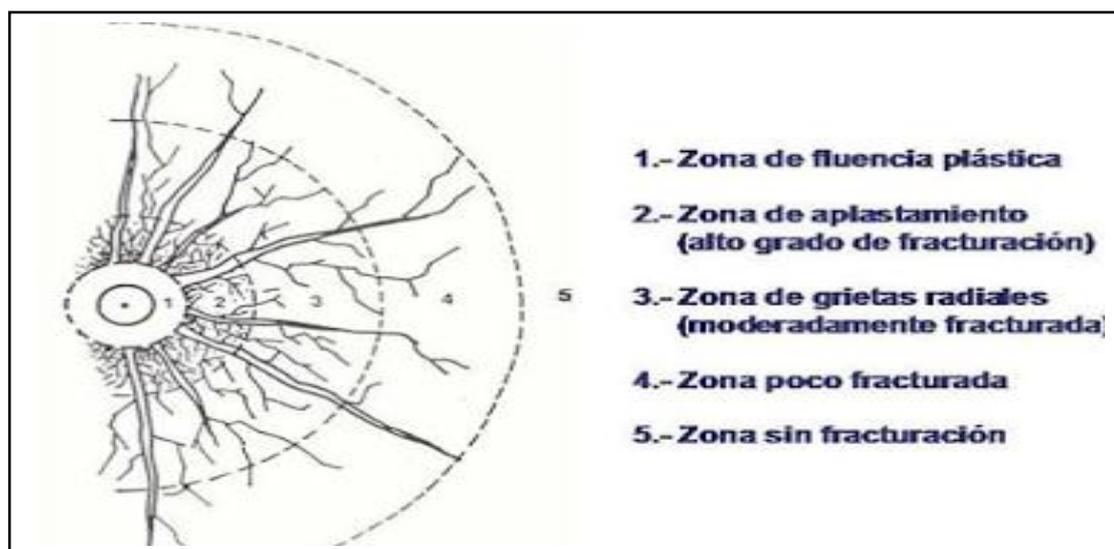
Fuente: Perforación y Voladura de Rocas I - Ames Lara, V. (2012).

Sin embargo, en todas las teorías se pueden observar los siguientes efectos claramente identificables que suceden uno tras otro en paralelo con intervalos de tiempo imperceptibles.

### 2.3.5 Detonación del explosivo

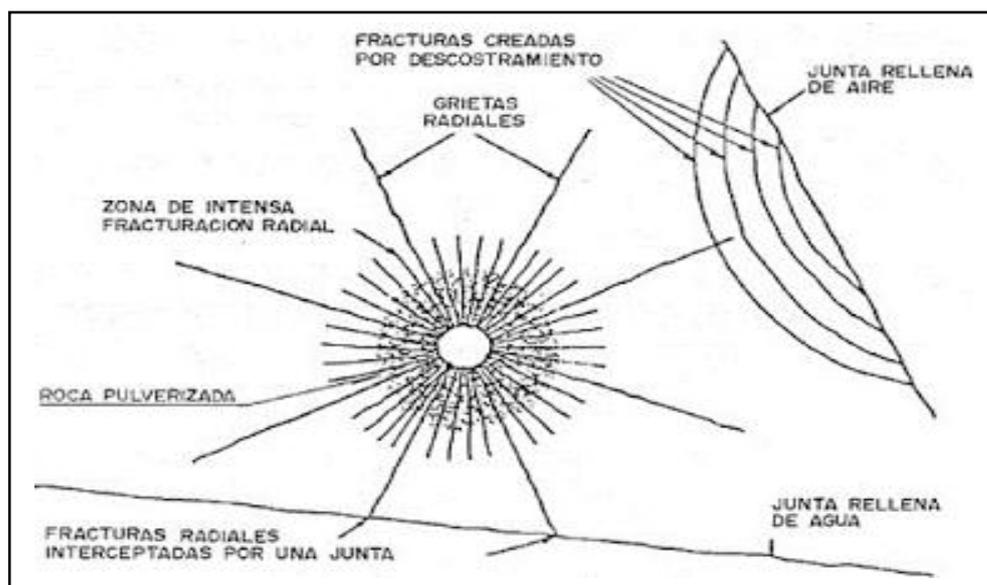
- Propagación de la onda de choque por el macizo rocoso.
- Expansión de gas a altas presión y temperatura.
- Movimiento de material o masa rocosa fragmentada.

En la detonación de un único taladro aislado de alguna cara libre se pueden observar el mecanismo de fracturación de la roca. Entonces con éste ensayo se distingue en primera instancia, que en las zonas cercanas radialmente se producen los siguientes fenómenos: Ensanchamiento del taladro a causa del efecto de compresión de la onda de detonación; y creación de fisuras generadas por el efecto de tracción de la onda de detonación. Estas fisuras son de tipo radial y a veces muy difíciles de observar.



**Figura 2.8.** Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.

Fuente: Perforación y Voladura de Rocas en Minería. Madrid- Bernaola, Castilla, Herrera. (2013).



**Figura 2.9.** Agrietamiento radial y rotura por reflexión de la onda de choque.

Fuente: Manual de Perforación y Voladura de Rocas - ITGM -España. (1991).

### 2.3.6 Diseño e importancia del taco en voladura de rocas

El retacado o taco es un parámetro del diseño de perforación y voladura de rocas. Normalmente se rellena con material inerte para que cumpla la función de retener, dentro del taladro, los gases producto de la explosión.

**Taco.** El taco es el relleno de la parte superior del taladro con material estéril. Su misión es la de retener los gases producto de la explosión, durante fracciones de segundos, suficientes para evitar que los gases fuguen por la boca del taladro, de esta manera trabaje por completo en el proceso de la fragmentación de la roca. Normalmente, para el taco, se emplea detritus producto de la perforación, debido a su disponibilidad, también es común utilizar arcilla, piedra chancada fina y angulosa, y hasta cartón en ocasiones, en taladros inundados, se deja el agua para que cumpla la función del taco, para la determinación del taco se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El tipo y tamaño del material a utilizar.
- La longitud de taco o de la columna del retacado.
- El taco más eficaz se alcanza cuando las partículas son de  $1/17 d$  a  $1/25 d$  ( $d =$  diámetro del taladro), otros estudios indican que al utilizar un material del taco de  $1/25 d$ , puede reducir la longitud de taco hasta un 41%.

### 2.3.7 Cálculo de la longitud de taco

Se considera que el taco debería ser como máximo el 50% de la altura de banco. Para calcular la longitud del taco, se tiene como igualdad inicial:

Longitud de carga + Longitud del retacado  $\leq$  Longitud de taladro. Para calcular la Longitud de taco (T) tenemos diversos modelos:

Según la teoría y modelo matemático de *Richard L. Ash*:

$$T = (0.5 \text{ a } 1.0) B$$

B = Burden

Según la Teoría de *C. J. Konya*:

T = B ; roca estratificada.

T = 0.72 B ; roca masiva.

B = Burden.

Según el diámetro del taladro, tenemos:

T = (33 a 35) D ; Roca blanda a intermedia.

T = (30 a 32) D ; Roca dura.

D = Diámetro de taladro.

En Desbroce:

$$T = 0.7 B + SC/2;$$

SC = Espesor de carga.

### **2.3.8 Mejora de la fragmentación**

Cuando la frecuencia de fracturas en la masa rocosa es alta, es más fácil de obtener fragmentación fina y los factores de energía asociados con la voladura tienden a ser bajos. Rocas duras altamente diaclasadas o fracturadas se comportan muy similar a rocas más blandas y más débiles. La combinación de roca y discontinuidades se puede considerar y modelar como una ruma de bloques mantenidos juntos por una

combinación de la cohesión de la superficie de las diaclasas, el coeficiente de fricción de las superficies de las diaclasas y los esfuerzos actuando en los bloques (ya sea esfuerzos hidrostáticos en aplicaciones de superficie o una combinación de esfuerzos hidrostáticos o tectónicos en aplicaciones subterráneas profundas).

Autores como *McKenzie* (1984) y el ISEE (1998), han sugerido que para lograr la máxima utilización de la energía del explosivo en el proceso de fragmentación es necesario equiparar la impedancia del explosivo lo más cercana posible a la impedancia de la roca. La impedancia se define como el producto de la velocidad y la densidad. Para el explosivo, la impedancia se refiere al producto de la densidad en el taladro y a la velocidad de detonación, mientras que en la roca la impedancia se define como el producto de la velocidad de las ondas P y la densidad. Luego, para una máxima fragmentación. Basado en el deseo del igualamiento de las impedancias, rocas masivas y de alta resistencia (con velocidades P en el rango de 4,500 a 6,000 m/s) se fragmentan mejor con un explosivo con alta densidad y alta velocidad de detonación.

### **2.3.9 Control de la fragmentación**

Los retardos ayudan a la fragmentación al introducir una acción de corte entre los taladros adyacentes. Si una fila de taladros se inicia simultáneamente, las grietas que crecen entre los taladros se favorecen, con poco crecimiento delante de los taladros hacia la cara libre. Bajo estas circunstancias, el burden tenderá a moverse como una hoja de roca, con poca fragmentación en el burden. Al retardar la detonación de un taladro adyacente, un taladro debe cortar un segmento de roca lejos de la masa principal de roca, proporcionando una fragmentación mejorada.

### 2.3.10 Resultados de la fragmentación

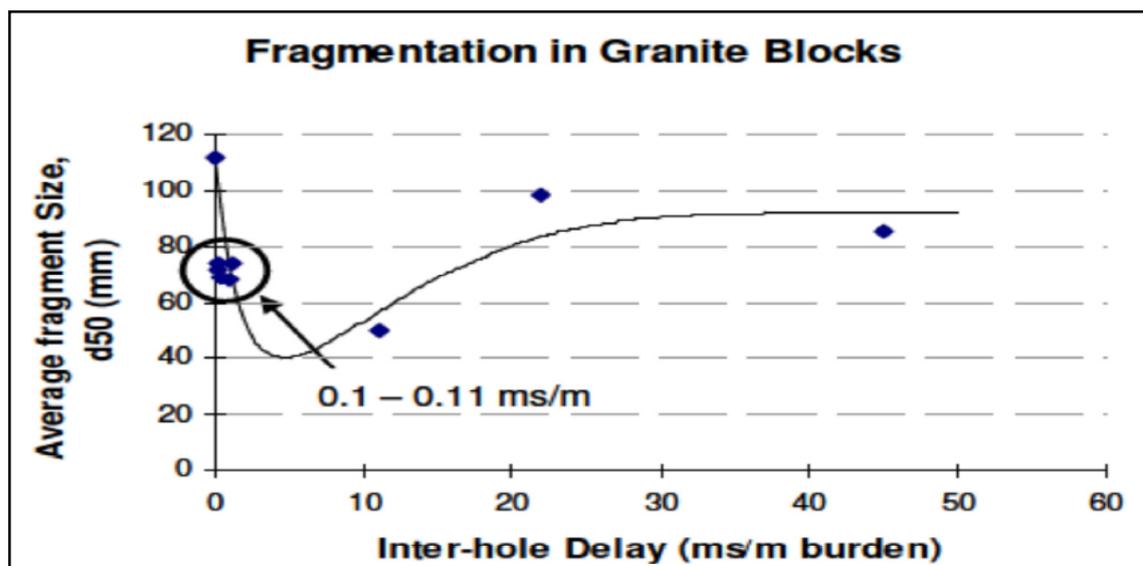
En muchos aspectos, este debe ser uno de los índices principales del funcionamiento del explosivo, ya que directamente mejora uno de los objetivos principales de la voladura: el requerimiento de fragmentar la roca para facilitar una excavación y remoción rápida. Sin embargo, la medición de la fragmentación de la voladura es uno de los puntos más difíciles que encaran los técnicos en voladura. La tecnología moderna está investigando los métodos de fotografía automática y el escaneo de imagen de videos, pero a la fecha no existe un método barato o simple y pocos grupos técnicos están preparados para cribar mecánicamente la pila completa de una voladura, que puede tener entre 10.000 a 1.000.000 de ton. Parámetros críticos de diseño, tales como el diámetro del taladro y la separación de los taladros se pueden estimar usando un conjunto de modelos y ecuaciones simples, pero estos deben ser sólo considerados como estimaciones iniciales.

### 2.3.11 Tipo de secuenciamiento

Posiblemente no hay cuestión sobre la que exista mayor desacuerdo en el mundo de la voladura que el retardo para obtener la fragmentación más fina. Los retardos más importantes en lo que afecta a la granulometría de la roca fragmentada parecen ser los entre taladros y entre filas, dado que mediante ellos se puede ajustar la intensidad de las tensiones en varias partes de la voladura. “Los retardos entre *decks* se emplean generalmente para el control de las vibraciones o de la forma de la pila” *Konya* (1995), más que para el control de la distribución de la pila. Existen dos paradigmas un tanto diferentes respecto al retardo óptimo entre taladros, aunque ambos dan mucha importancia a las interacciones de cargas adyacentes. Los estudios de *Rossmannith* (2002, 2003) y *Vanbrabant* (2006), resumen el primer paradigma apuntando a tiempos de retardo entre taladros de sólo unos milisegundos, basado en la gran intensidad de

redes de fracturas que pueden obtenerse si el retardo se ajusta para alcanzar la máxima interacción de las ondas de compresión o de cizalla en la zona de la roca entre *taladros*.

*Katsabanis* (1996, 2006), apoyan la importancia de este proceso de fracturación posterior y demuestran que el retardo entre taladros para maximizar el proceso de fragmentación es del orden de 3 a 10 MS por metro de burden. *Stagg & Rholl* (1987), sugieren que el proceso de fragmentación de cada taladro debe haberse completado antes de que salga el siguiente taladro, y que la fragmentación tiene lugar en dos procesos distintos: las ondas de tensión desarrollan una red de fracturas en una zona relativamente pequeña alrededor del taladro y la presurización del gas extiende las fracturas radiales hacia la cara libre. Sugieren igualmente que el retardo entre taladros no debe ser menor que aproximadamente 2.3 ms/m de burden. *Katsabanis & Liu* (1996) observaron que la fragmentación en la cara libre en pequeñas voladuras en bancos de granito se producían dentro de aproximadamente 2 ms/m de burden, pero que la fragmentación continuaba debido a la acción del gas hasta tiempos de 9 MS/m de burden. El estudio de *Katsabanis* (2006), cuyos resultados se resumen en el Gráfico 3, es particularmente interesante porque también considera el mismo intervalo de retardos muy cortos propugnados por los partidarios del primer paradigma (0.2 a 1 ms/m de burden) y a pesar de ello estos autores concluyen que no pudieron encontrar pruebas de que los retardos cortos producen una granulometría más fina y que ésta se consigue mediante tiempos de retardo mayores (de hasta 10 MS/m de burden). Los resultados de *Katsabanis* (2006) muestran también claramente que tiempos de retardo entre taladros excesivos, resultarán en granulometría más gruesa y que para granito, esto está de acuerdo con tiempos de retardo entre taladros mayores de 10 MS/m de burden. Ver Figura 2.10.

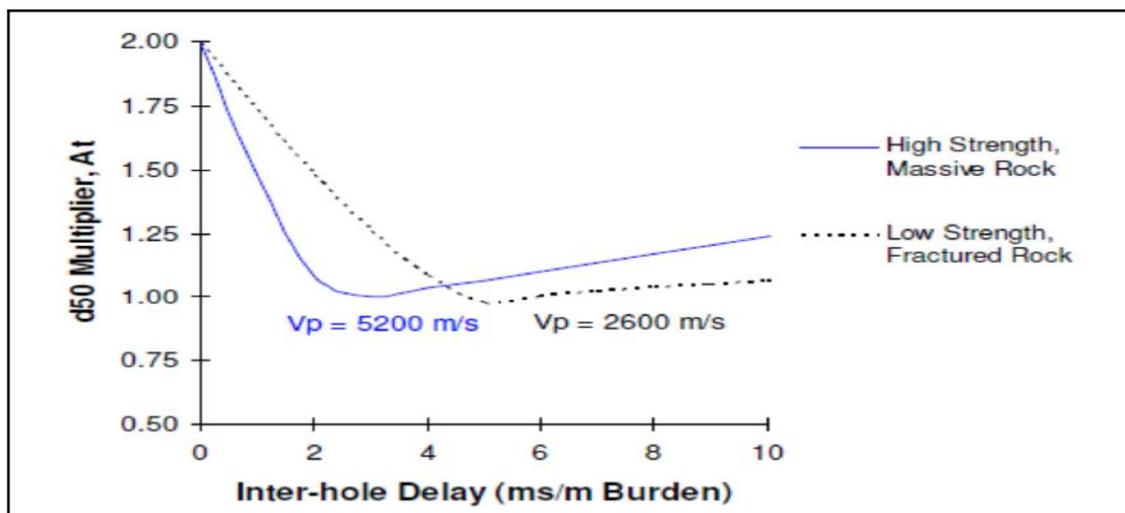


**Figura 2.10.** Fragmentación obtenida en bloques de granito con tiempo de retardo entre taladros variable.

Fuente. Katsabanis, 2006.

Cunningham (2005), propuso una relación entre el tamaño medio de fragmento y el retardo entre taladros para la mayor fragmentación, basada en los resultados de ensayos a pequeña escala realizados por Bergman (1983), en grandes bloques sin grietas.

En esta relación, la granulometría se hace más gruesa de forma abrupta para tiempos de retardo inferiores al óptimo y también de forma más suave para tiempos de retardo mayores que el óptimo. La línea de tendencia propuesta no es muy diferente de lo que se puede ver a partir de los datos de *Katsabanis* (2006) a lo largo del intervalo de tiempos de retardo de 0 a 10 MS/m, según la curva superpuesta en la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Línea de tendencia de la fragmentación vs. retardo entre taladros.

Fuente. *Cunningham* (2005). Modificada de la Figura XX del artículo original normalizando el eje vertical.

Los estudios de *Katsabanis* (2006) y *Bergmann* (1983) en condiciones ideales (sin grietas) muestran ambos que tiempos de retardo muy cortos producen granulometría más gruesa. Los estudios de *Katsabanis* (1996) y *Stagg & Rhol* (1987) muestran ambos que tiempos de retardo cortos producen granulometría gruesa en masas rocosas con juntas y discontinuidades.

### 2.3.12 Índice de calidad del macizo rocoso (RQD)

*Priest and Hudson* (1976), sugirieron la estimación del índice RQD a partir de la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$ , mediante la siguiente expresión que proporciona, el valor teórico mínimo del RQD es: Ver Tabla 2.2.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Donde:

$\lambda$  = Número de discontinuidades por metro lineal.

El valor de  $\lambda$  se calcula en función al número total de diaclasas en la progresiva.

**Tabla 2.2.** Valores de índice RQD.

Índice de Calidad R.Q.D. (%)	Calidad
0-25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente.

Fuente. Gonzales de Vallejo L.-2002.

### 2.3.13 Índice de la roca a la voladura (Blastibility)

Este índice fue desarrollado por Lilly, y nos da una idea de cuan fácil o difícil es volar una roca.

$$BI = 0.5 (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI)$$

Donde:

RMD = Descripción del macizo rocoso.

JPS = Espaciamiento de las juntas planares.

JPO = Orientación de las juntas planares.

SGI = Gravedad específica.

RSI = Dureza de la roca (Hardness).

RSI = 0.05 (RC).

RC = Resistencia a la compresión simple.

Para una roca totalmente masiva el espaciamiento entre juntas es intermedio y con una resistencia a compresión de 140 a 230 MPa, vemos que los rangos de factor de carga se mueve entre: 0.25 y 0.3 kg/TM de ANFO, dicho explosivo tiene un densidad de

0.8g/cm<sup>3</sup>, sin embargo con el uso de ANFO pesado estos factores de carga se van a un rango más elevado de 0.46 – 0.56 kg/TM.

### 2.3.14 Índice de volabilidad modificado para un caso particular

El índice planteado por Lilly, se le puede ingresar nuevos parámetros, como la alteración y la abundancia de esta particularidad, dichos valores entran restando el índice original. Cada mina tiene sus particularidades, propuesta:

$$BI = 0.5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + RSI - ALT \times AB)$$

Donde:

RMD = Descripción del macizo rocoso.

JPS = Espaciamiento de las juntas planares.

JPO = Orientación de las juntas planares.

SPG = Gravedad específica.

RSI = Dureza de la roca (*Hardness*).

RSI = Razón de influencia de la resistencia.

ALT = Tipo de alteración.

AB = Abundancia.

## 2.4 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI

Ver Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Clasificación de parámetros y sus valores (*Bieniawski*) 1989.

Parámetros	ESCALA DE VALORES							
	Resistencia de la roca intacta	Carga Puntual	80 kg/cm <sup>2</sup>	40-80 kg/cm <sup>2</sup>	20-40 kg/cm <sup>2</sup>	10-20 kg/cm <sup>2</sup>	10kg/cm <sup>2</sup>	
A compresion simple			1000-2000	500-1000	250-500	100-250	30-100	10-30
		2000 Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
VALOR		15	12	7	4	2	1	0
R. Q.D.		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	25%		
VALOR		20	17	13	8	3		
Espaciado de Juntas		3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm	50 mm		
VALOR		30	25	20	10	5		
Condición de Juntas		Muy rugosas sin continuidad, cerradas, paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1mm. de separación paredes de roca dura	Ligeramente rugosa < 1mm. de separación paredes de roca suave	Espejo de falla o relleno de espesor < 5 mm o abiertos 1-5 mm fisuras continuas	relleno blando de espesor < 5mm ó abiertas < 5 mm fisuras continuas		
VALOR		25	20	12	6	0		
Aguas subterráneas	Cant. Infiltracion 10 m de tunel	Ninguna		25 litros/min	25 - 125 litros/min	>125 litros/min		
	Presión de agua	Cero		0.0 - 0.2	0.2 - 0.5	0.5		
	Esfuerzo principal							
	Situación general	Totalmente seco		Solo húmedo agua interst.	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua		
VALOR		10		7	4	0		

Fuente. Ingeniería geológica - Gonzales de Vallejo L. 2002.

Esta clasificación geomecánica se basa en el índice RMR “*Rock Mass Rating*”, que da una estimación de la calidad del macizo rocoso, teniendo en cuenta:

- Resistencia compresiva de la roca.
- Índice de la calidad de la Roca - RQD.
- Espaciamiento de juntas.
- Condición de juntas.
- Presencia de agua.
- Corrección por orientación.

## 2.5 DEFINICIONES CONCEPTUALES

### 2.5.1 Área de voladura

Área en la cual la concusión (onda de choque), el material lanzado o los gases producidos por una detonación podrían ocasionar daños a las personas, al determinar el área de voladura deberán considerarse los siguientes factores:

- La geología o el material que se va a volar;
- Las mallas de perforación y voladura;
- La mezcla explosiva burden, profundidad, diámetro y ángulo de los taladros;
- La experiencia en voladura que se tenga de la mina;
- El sistema de retardo, factor de carga y libras por retardo;
- El tipo y cantidad de material explosivo; y
- Tipo y cantidad de taco.

### 2.5.2 Agente de voladura

Cualquier compuesto o mezcla química insensible a los fulminantes que no contengan ningún ingrediente explosivo y que pueda hacerse detonar cuando se inicia con un primer (iniciador) explosivo de gran potencia (por ejemplo ANFO).

**Boosters (iniciadores).** Accesorios de voladura constituida por una carga explosiva detonante sin medios para iniciarse. Se usan para iniciar a los agentes de voladuras.

**Cordón detonante.** Cordón flexible que contiene un núcleo central de altos explosivos, el cual puede usarse para iniciar otros explosivos.

### 2.5.3 Dispositivos detonadores, no eléctricos para la voladura

Detonadores no eléctricos ensamblados y activados con medios tales como una mesa de seguridad, manguera fanel, tubo de destellos o cordón detonante. Pueden ser de diseño instantáneo o incorporar elementos de retardo. Aquí se incluyen los detonadores de retardo que incorporan cordón detonante.

**Detonador.** Cualquier dispositivo que contenga una carga detonadora usada para iniciar un explosivo. Entre estos dispositivos se incluyen los fulminantes eléctricos y no eléctricos instantáneos o los fulminantes de retardo, y también los conectores de retardo. El término “detonador” no incluye al cordón detonante. Comúnmente, los detonadores consisten en un pequeño tubo metálico o plástico que contiene explosivos, tales como ácido de plomo, PETN o combinaciones de explosivos. Están diseñados para iniciar un tren de voladura. Pueden construirse para detonar inmediatamente o pueden contener un elemento de retardo. Pueden contener no más de 10g de peso total de explosivos, sin incluir las cargas de ignición y retardo, por unidad.

**Dinamita.** Explosivo detonante que contiene un ingrediente explosivo líquido (generalmente nitroglicerina, ésteres orgánicos similares de nitrato, o ambos), mezclado uniformemente con un material absorbente, como pulpa de madera, y que usualmente contiene materiales como nitrocelulosa, nitrato de sodio y de amonio.

**Emulsión.** Material explosivo que contiene cantidades sustanciales de oxidantes disueltos en pequeñas gotas de agua, rodeados por un combustible inmiscible.

#### 2.5.4 Explosivo de voladura

Sustancias explosivas detonantes usadas en minería, construcción y tareas similares. Los explosivos de voladura pueden contener componentes inertes tales como diatomita y otros ingredientes menores, como agentes colorantes y estabilizadores.

#### 2.5.5 Accesorio deflagrante

Sustancia por ejemplo, de propulsión que reacciona por deflagración en vez de hacerlo por detonación cuando se enciende y es usada de manera normal.

#### 2.5.6 Explosivo detonante

Sustancia que reacciona por detonación en vez de por deflagración cuando se inicia y es usada de manera normal.

#### 2.5.7 Altos explosivos

Materiales explosivos que se usan para detonar por medio de un fulminante, cuando no están confinados (por ejemplo, dinamita, polvos centellantes y salvas a granel).

#### 2.5.8 Bajos explosivos

Materiales explosivos pueden ser usados para deflagrar cuando están confinados por ejemplo: pólvora negra, mecha de seguridad, dispositivos de incendio, mechas rápidas y encendedores de mechas.

**Punto de inflamación.** La temperatura mínima a la cual un líquido libera vapor suficiente para formar una mezcla inflamable de vapor y aire cerca de la superficie del líquido.

### **2.5.9 Mecha de seguridad**

Artículo que consiste en un núcleo de pólvora negra de grano fino, rodeado por tejidos flexibles con una o más cubiertas protectoras externas. Cuando se enciende, se quema a una velocidad predeterminada sin efecto explosivo.

## **2.6 SOFTWARE WIP FRAG 2.6-VERSIÓN 2010**

El software de análisis de imagen Wip ware es el producto final de más de diez años de investigación, y ha sido desarrollado y probado en una amplia gama de aplicaciones. Cada esfuerzo tiene el propósito de proveer un producto confiable, apoyado por un respaldo de Wip ware Inc.

### **2.6.1 Medición de la fragmentación**

La medición de la fragmentación por voladura es una adición reciente a una extensa familia de aplicaciones de la granulometría. Sin embargo, mientras las partículas pequeñas se pueden medir en laboratorios a través del filtrado, la centrifugación, la sedimentación, o la microscopía óptica, sólo los métodos óptico digitales (fotoanálisis) alcanzan algún valor cuando los fragmentos son más grandes, como sucede con las voladuras.

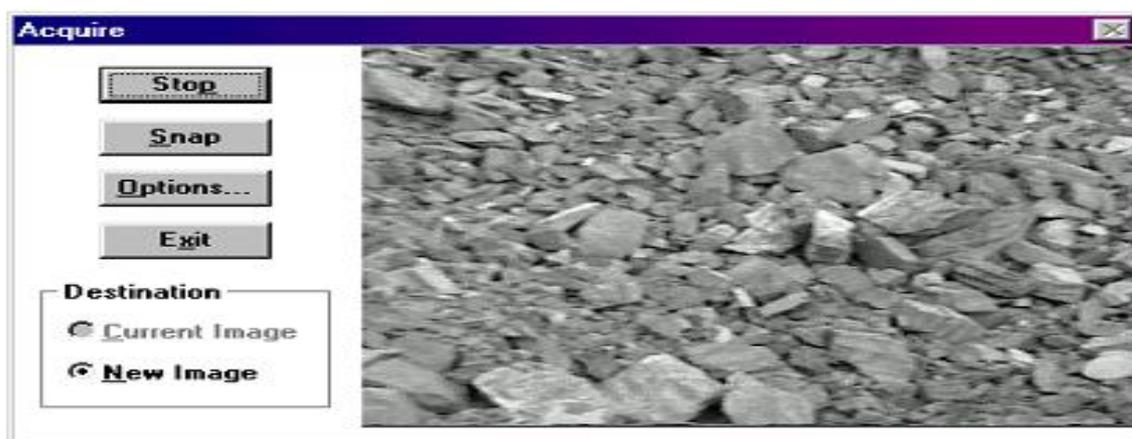
### **2.6.2 El método Wip frag**

*Wip frag* comienza con una imagen de video de la roca quebrada y lo convierte en una “red” de fragmentos. Luego mide la red, y muestra y delinea una selección de estadísticas de fragmentación y gráficos. *Wip frag* le permite comparar la red resultante con la imagen de la roca y corregir inexactitudes por medio de la edición manual con el Mouse. *WipFrag* está diseñado para dos tipos principales de entrada:

- **La entrada de cámara itinerante usa una cámara portátil.** Para la mayoría de las aplicaciones se recomienda una videocámara liviana y resistente. Las cintas de video proporcionan almacenamiento compacto para cualquier cantidad de imágenes, evita retrasos por procesamiento de películas y le permite combinar imágenes a diferentes magnitudes para mejorar precisión y resolución. La estación de trabajo *Wip frag* también permite entrada en forma de fotos impresas, diapositivas de 35 mm, discos de cámaras digitales o imágenes en vivo de roca chancada.
- **El monitoreo en línea.** Usa videocámaras fijas enfocadas en puntos de descarga, correas transportadoras, etc. Las imágenes son automáticamente capturadas en intervalos preestablecidos en *scan mode* o gatillados por sensores de movimiento cuando un camión pasa bajo una cámara.

### 2.6.3 Prueba de software MRT

La caja de diálogo de captura de video del MRT Image *Wizard*. Ver Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Imagen después de la voladura en *Wip frag*.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

#### 2.6.4 Prueba del software Video Capture Essentials (VCE)

Ver Figura 2.12.

La captura es en la caja de diálogo de captura de video del VCE Video Capture Essentials.

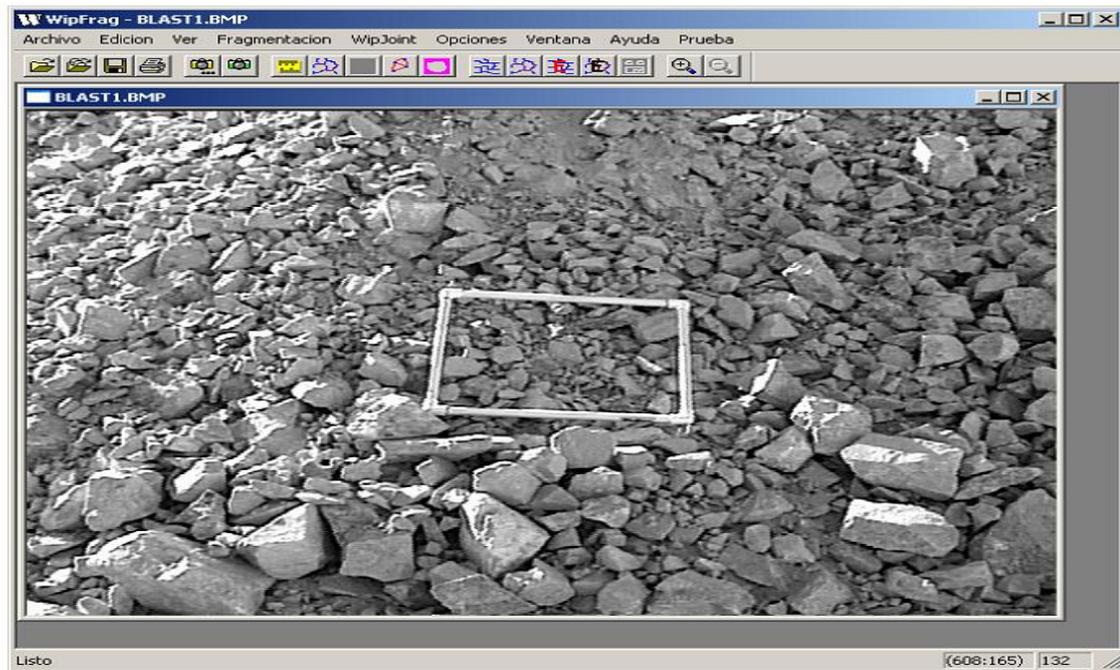


**Figura 2.12.** Captura de imagen.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

#### 2.6.5 Sistema operativo de Wip frag

**Ventana WipFrag.** La ventana de *Wip frag* posee dos barras principales una barra de despliegue o barra de menú principal y barra de comandos y una ventana principal de imagines. Ver Figura 2.13.



**Figura 2.13.** Ventana principal de *Wip frag*.

Fuente. Manual de usuario de *Wib frag* 2010.

### 2.6.6 Configuración básica

Algunas de típicas operaciones de configuración de *Wip frag* consistirán en las siguientes:

- Opción / Parámetros de detección de bordes. Configure los parámetros que controlan los algoritmos de detección de los bordes del bloque.
- Opciones / Opciones de filtro. Configure los títulos, modelos, nombres de archivos, categorías de tamaños, calibraciones, y tamaños de finos.
- Opciones / Edición de zona de exclusión. Configura zonas en la imagen, las cuales serán excluidas del análisis.
- Opciones / Métrico / Imperial. Selecciona unidades de medida, metros o pulgadas.

### 2.6.7 Operaciones básicas de *Wip frag*

Menús principales y barra de herramientas. Es una barra de herramientas de despliegue en cada uno de estas herramientas existe un panel de dialogo representados por un icono con su nombre respectivo desde archivos hasta prueba, se le conoce también con el nombre de menú de barra de despliegue. Ver Figura 2.14.



**Figura 2.14.** Barras de comandos de *Wip frag*.

Fuente. Manual de usuario de *Wibfrag* 2010.

**Función básica.** Una típica operación de *Wipfrag* se realiza mediante los comandos los cuales se encuentran en barra en la parte superior de la ventana de dialogo.

### 2.6.8 Diálogo de Captación de imagen nueva

Ver Tabla 2.4 y Figura 2.15.

- **Vista previa (*Preview*):** Proyecta una imagen “viva”
- **Snap:** Capta una imagen y la transfiere al buffer huésped (host buffer) que almacena temporalmente los datos, y sale del diálogo.
- **Cancela (*Cancel*):** Se sale del diálogo sin captar una imagen.
- **Brillo (*Brightness*):** Programa el aumento del amplificador en el tablero de digitalización. **Contraste (*Contrast*) y Omisión (*Defaults*)**
- **Cámara:** Seleccione cual cámara estará activa para el tablero digitalizador Coreco.

- **Remover interlazado (*remove interlace*).**

**Tabla 2.4.** Funciones básicas de *Wib frag* de barra de herramientas.

Funciones básicas de <i>wip frag</i> de barra de herramientas	
COMANDO	FUNCION
	Captando una nueva imagen, El botón amarillo abre la caja de diálogo de captura de la nueva imagen, el verde captura directamente una imagen nueva.
	Abriendo disco de imágenes. Abra un archivo de bitmap (.bmp) o jpeg (.jpg) de cualquier medida o forma, o una base de datos (.dat, .fnt) para graficar. Un archivo de bitmap debe ser una imagen de 8-bit en una escala de gris. En cualquier caso, las imágenes deben tener pixeles al cuadrado.
	Abre uno o más archivos de información (.dat) para graficar. Si hay más de un archivo de información, se hace un análisis refundido. El archivo de información múltiple debe estar en el mismo directorio
	Ponga la escala sobre la imagen. (Este paso no es necesario si la escala es la misma en la imagen capturada que en la imagen previa, o si se abre una imagen ya creada y guardada de un disco <i>Wipfrag</i> , que contenga su propia escala.
	Activar los algoritmos automáticos de detección de bordes
	Haga un filtro virtual, para medir tamaños de bloque y generar un gráfico
	Muestra la caja estándar de diálogo para impresión de Windows
	Grabar una imagen activa como un archivo de <i>bitmap</i> (archivo de foto)
	Deshacer última edición.

	Coloca el modo de línea, de forma que dibuja una línea entre el punto donde el botón izquierdo del mouse es presionado y hasta el punto donde el botón del mouse es liberado.
	Coloca el modo de línea poligonal, de forma que dibuja una línea poligonal entre los puntos identificados por un clic izquierdo, terminando con un doble clic izquierdo.
	Coloca el modo de caja borradora, así todas las líneas azules en una caja rectangular, las esquinas se definen por el punto
	Coloca el modo de borrar línea, así un clic correcto sobre una línea cubierta de azul borrará la línea desde el punto donde el botón izquierdo del mouse es presionado hasta el punto donde el botón es liberado. Todas las líneas azules son borradas de vuelta a sus raíces a un nodo rojo
	Coloca el modo en que las líneas azules y poligonales vayan a los existentes nodos rojos y puntos finales verdes
	Articula modo para mostrar/esconder la cubierta de bloques destacados
	Muestra el menú zona de exclusión.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.



**Figura 2.15.** Ventana de captura de imagen nueva.

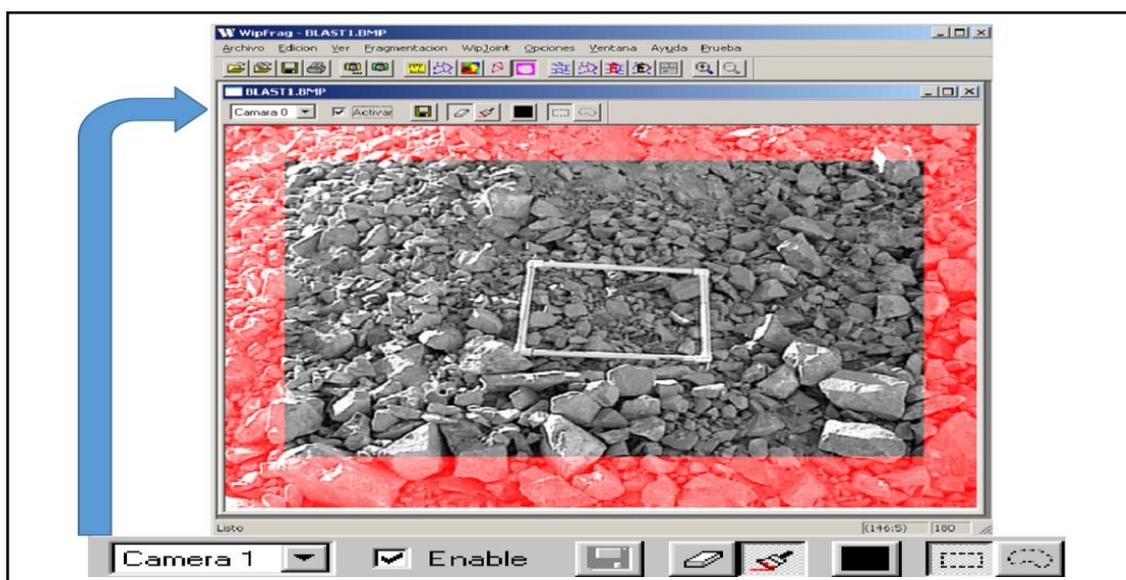
Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

### 2.6.9 Menú de edición y herramientas

*WipFrag* permite la edición manual para insertar límites perdidos entre fragmentos fusionados, y para borrar bordes falsos cuando un fragmento se ha desintegrado en 2 o más pedazos. En el extremo, la edición puede ser usada para rastrear una red de fragmentos visibles al ojo pero no para el computador. Sin embargo, la experiencia indica que unos pocos minutos de limpieza, es todo lo que se necesita en la mayoría de los casos.

### 2.6.10 Editar barra de herramienta de zona de exclusión

Ver Figura 2.16



**Figura 2.16.** Barra de zona de exclusión.

Fuente. Manual de usuario de *Wib frag* 2010.

### 2.6.11 Funciones básicas de barra de herramientas de zona de exclusión

Las funciones básicas está conformado por varios comandos cada una de las cuales tienen tareas específicas que se requieren en la zona de exclusión. Tabla 2.5.

**Barra de herramientas.** Articula para ver barra de herramientas.

**Barra de estado.** Articula para ver barra de estado.

**Tabla 2.5.** Funciones básicas de menú de herramientas de zona de exclusión.

Funciones básicas de barra de herramientas de zona de exclusión	
Comando	Función
	<b>Borrar.</b> Pone modo de borrar acciones subsecuentes removerán partes de la zona de exclusión.
	<b>Llenar.</b> Pone modo de llenado; acciones subsecuentes agregarán partes a la zona de exclusión
	<b>Dibujo.</b> Llena la pantalla completa con llenado rojo o borra el llenado rojo dependiendo.
	<b>Rectángulo.</b> Talla un rectángulo fuera de o hacia dentro de la zona de exclusión
	<b>Polígono.</b> Talla un polígono fuera de o hacia dentro de la zona de exclusión
	Acercar en la imagen.
	Alejar en la imagen

Fuente. Manual de usuario de *Wib frag* 2010.

### 2.6.12 Menú de fragmentación

El menú de fragmentación está constituido por cuatro componentes: Ver Figura. 2.17.



**Figura 2.17.** Menú de fragmentación.

Fuente. Manual de usuario de *Wib frag* 2010.

### 2.6.13 Ajustar caja de diálogo de escala

Es un panel de diálogo para determinar la escala. Ver Figura 2.18.



**Figura 2.18.** Ventana de determinación de escala.

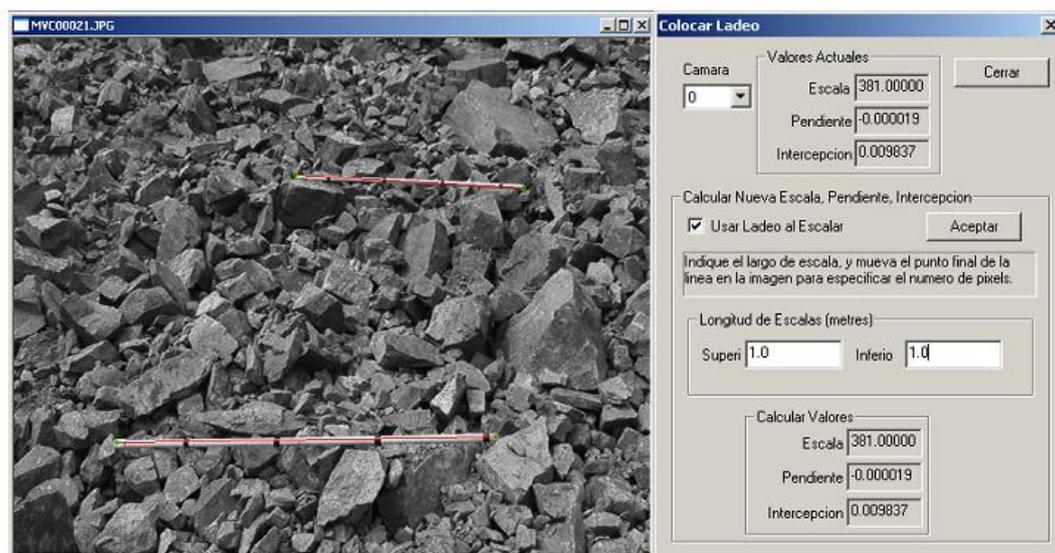
Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

- **Cámara** - Selector para número de cámara, cada uno tiene una escala guardada en forma separada.
- **OK** - Acepta la información en la caja de diálogo.
- **Cancela** - Rechaza y cancela la información en la caja de diálogo.
- **Escala** - Permite al usuario ingresar manualmente un factor de escala en pixeles por metro.
- **Calcular** - Instrucciones para destacar la barra escala.
- **Largo** - Usada para ingresar el largo actual del objeto.
- **Pixeles** - Despliega el factor escalar calculado en pixeles por metro.

### 2.6.14 Configuración de pendiente

Abre la caja de diálogo de configuración de la pendiente para medir la pendiente.

Configurar caja de diálogo de la pendiente. Ver Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Ventana de escala pendiente intercepción.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

- **Cámara.** Selector para número de cámara, cada uno tiene guardado por separado la escala de pendiente.
- **OK.** Acepta la información en la caja de diálogo.
- **Cancela.** Rechaza y cancela la información en la caja de diálogo.
- **Snap.** Renueva la imagen en vivo.
- **Use escalamiento de la pendiente.** Articule para seleccionar escala con pendiente o normal.
- **Escala superior.** Permite al usuario ingresar manualmente la longitud de la escala superior.
- **Escala inferior.** Permite al usuario ingresar manualmente la longitud de la escala inferior.
- **Pendiente.** Muestra la pendiente de la función de escalamiento de la pendiente.

- **Intercepta.** Presenta la intercepción de la función de escalamiento.

### 2.6.15 Menú Wip joint

- *Wip joint* es un modelo opcional el cual debe estar específicamente autorizado en la llave de seguridad; de otra manera las operaciones *Wip joint* no pueden ser usadas.
- *Wip joint* usa operadores de detección de bordes duales, uno para capturar los elementos lineales de la estructura para orientación y el otro para forzar polígonos cerrados alrededor de bloques para aparentes tamaños de bloques. Ambas redes necesitan ser generadas en orden de poder efectuar los análisis.

### 2.6.16 Herramientas gráficas de Wip frag

Ver Tabla 2.6.

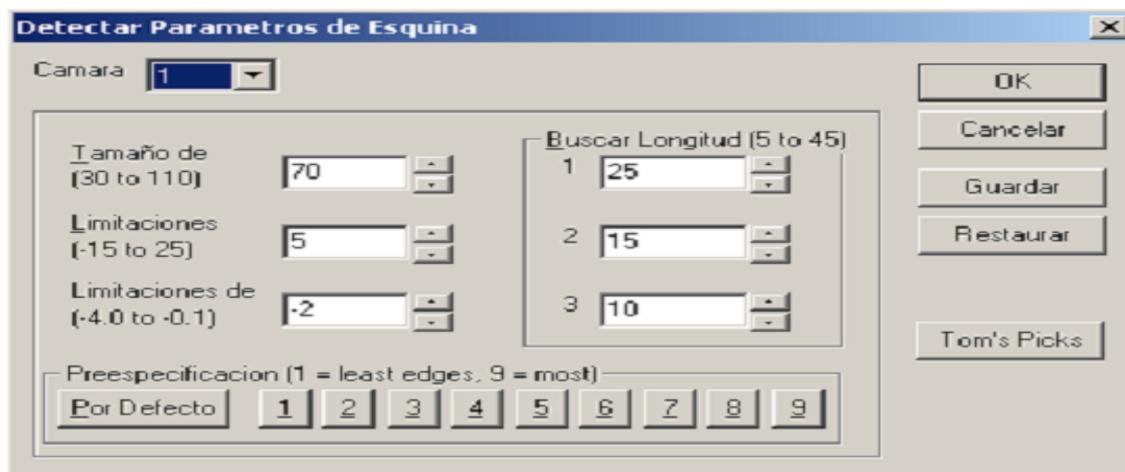
**Tabla 2.6.** Funciones básicas de herramientas gráficas de Wip frag.

Funciones básicas de herramientas gráficas de Wip Frag	
Comando	Función
	Mostrar el histograma “rojo”
	Mostrar la curva de tamaño acumulativa “azul”
	Mostrar la tabla de tamaños acumulativa, ya sea en tamaños de mallas estándares
	Medir el tamaño de los bloques, generar un disco de archivo, y dibujar un gráfico.
	Genera la red superpuesta de los bloques destacados

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

### 2.6.17 Parámetros de detección de bordes

Es una ventana de diálogo para detectar bordes. Ver Figura 2.20.



**Figura 2.20.** Panel detector de bordes.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

- **Cámara.** Selector para número de cámara, cada un guarda parámetros de detección de bordes por separado.
- **OK.** Acepta la información en la caja de diálogo.
- **Cancela.** Rechaza y cancela la información en la caja de diálogo.
- **Grabar.** Renueva el actual conjunto de parámetros.
- **Restaura.** Restaura un conjunto de parámetros guardados.
- **Tom's Picks.** Un conjunto de parámetros recomendados por Tom.
- **Prestablecidas 1-9.** Nueve combinaciones preestablecidas de parámetros de detección de bordes.

### 2.6.18 Configuración de detección de bordes

Los parámetros de detección de bordes son valores numéricos, usados por *Wip frag* durante varias etapas de la detección de fragmentos de borde. Las configuraciones por defecto mostradas en el menú anterior, son recomendadas para operación normal con

buena calidad de imagen. Juzgue los resultados comparando la red con la imagen. Si la fidelidad de la red parece menos que ideal, usted puede tratar de reemplazar la configuración por defecto por 1 de 9 combinaciones de valores preestablecidas, por medio de repetidos clics en Preestablecidas; preestablecido 1 entrega la mayoría de los bordes y preestablecido 9 los menos. (Intente preestablecido 5 como punto de partida). *Wip frag* usará los valores seleccionados hasta que usted haga posteriores cambios. Revise la cubierta de red-sobre-roca para ver si la detección de bordes es mejorada. Seleccione *Wip frag* por defecto para restaurar los valores por defecto en cualquier momento.

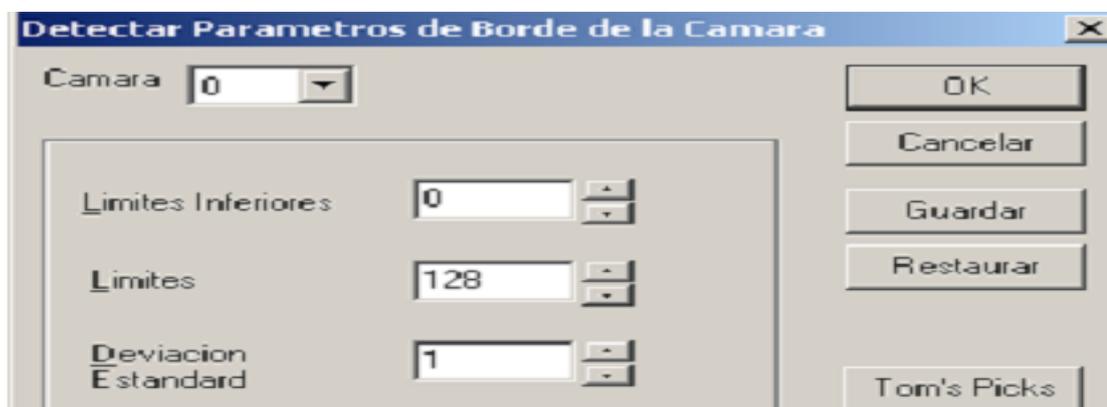
*Tom's Picks* es una serie de parámetros que al parecer trabajan bien con agregados de rocas heterogéneos como la fragmentación por voladura. La siguiente es una descripción de los parámetros:

- **Tamaño de la ventana** es la longitud en pixeles del lado de una ventana cuadrada usada para umbrales. La medida de la imagen es 640 por 480 pixeles (768 por 574 para versiones PAL) y el fragmento más largo debería medir alrededor de 100-130 pixeles atravesado, alrededor del 15% a 20% del ancho de la imagen. Disminuyendo el tamaño de la ventana tenderá a causar fusión de las partículas finas, mientras que aumentándolo, lleva a un quiebre de las partículas más grandes y pérdida de información en sombras.
- **Umbral.** Es la diferencia en intensidad (nivel de tono gris, rango entre un píxel y el promedio de su ventana). Aumentando el umbral da por resultado en menor cantidad de bloques (algunos bloques eliminados falsamente), y disminuyendo el umbral resulta en más bloques (algunos falsamente identificados).

- **Umbral de valle.** Especifica un nivel mínimo de desnivel de tono gris para gatillar. Aumentando el Umbral de Valle da menor cantidad bloques (algunos juntos falsamente) y su disminución resulta en más bloques (algunos de los más grandes se desintegran).
- **Búsqueda de longitudes 1,2 y 3.** son las longitudes radiales de búsqueda en pixeles medidos desde un vértice dado, que el operador del segmento busca para encontrar y unir. La búsqueda del longitud 1 debe ser más grande que la búsqueda del longitud 2, la cual a su vez debe ser más grande que la búsqueda del longitud 3. Aumentando estos los parámetros resulta en más bloques (algunos falsamente identificados) mientras que disminuyendo éstos resulta en menor cantidad bloques (algunos bloques falsamente eliminados).

### 2.6.19 Parámetros inteligentes

Es un panel para detectar parámetros de borde. Ver Figura 2.21.



**Figura 2.21.** Panel para detectar parámetros en *Wip frag*.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

- **Cámara.** Selector para un número de cámara, cada uno tiene guardados parámetros separados de detección de bordes.
- **OK.** Acepta la información en la caja de diálogo.

- **Cancela.** Rechaza y cancela la información en la caja de diálogo.
- **Grabar.** Renueva el actual conjunto de parámetros.
- **Restaurar.** Restaura un conjunto de parámetros grabados.
- **Tom's Picks.** Un conjunto de parámetros recomendados por Tom Palangio.
- **Umbral inferior.** Umbral inteligente para iniciación de rastreo.
- **Umbral superior.** Umbral inteligente para terminar rastreo.

### 2.6.20 Configuración de detección inteligente de bordes

Los parámetros de detección de bordes son valores numéricos usados por Wip joint durante la etapa de generación de bordes. Estos son seleccionados para producir los mejores rasgos lineales en la imagen, en la cual la orientación de las discontinuidades es medida.

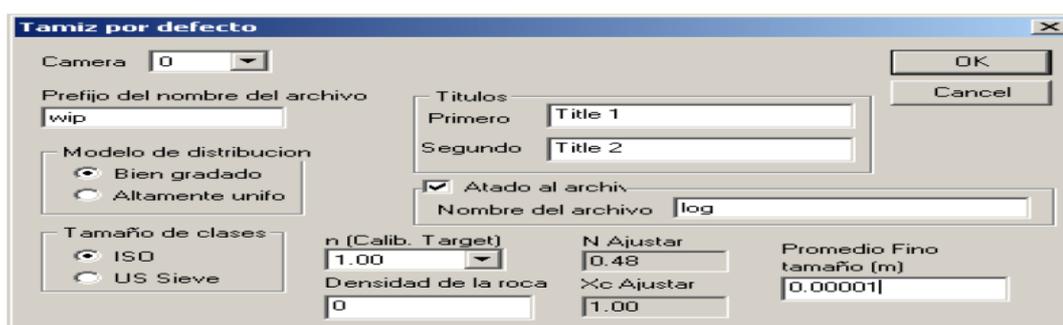
La siguiente es una descripción de los parámetros:

- **Desviación estándar Gaussiana.** Se refiere al factor de suavización de la distribución por convolución. Disminuyendo la Desviación Estándar resultará en que serán identificados bordes más reales (y falsos). Mientras que aumentando ésta, resultará en bordes menos reales (y falsos). El análisis es muy sensible para este parámetro.
- **El umbral inferior.** Es la magnitud (intensidad) en la imagen en cuyo punto se inicia el rastreo. El análisis es relativamente insensible al valor de este parámetro.

- **El umbral superior.** Es la magnitud (intensidad) en la imagen, en cuyo punto termina el rastreo. Disminuyendo el umbral alto resultará en menos bordes (y menor ruido) siendo identificados. El análisis es relativamente insensible al valor de este parámetro.
- Intente empezar con una desviación estándar gaussiana de 1.
- Si hay mucho ruido en la imagen, aumente este valor.
- Si hay muy pocos bordes en la imagen, disminuya este valor.
- Usualmente, el Umbral Superior de Rastreo puede ser configurado bastante alto, y el Umbral inferior, bastante bajo para buenos resultados. Configurando el Umbral inferior, demasiado alto, causará el quiebre de los bordes ruidosos. Configurando el Umbral superior, demasiado bajo, aumenta el número de fragmentos de bordes falseados y no deseados, apareciendo en la salida.

### 2.6.21 Opciones de mallas

Ver Figura 2.22.



**Figura 2.22.** Ventana de tamiz por defecto para malla.

Fuente. Manual de usuario de *Wip frag* 2010.

- **Cámara.** Selector para número de cámara, cada uno tiene opciones de guardado por separado.

- **OK.** Acepta la información en la caja de diálogo.
- **Cancel.** Rechaza y cancela la información en la caja de diálogo.
- **Prefijo para nombre de archivo.** El usuario define 4 caracteres prefijados para los nombres de los archivo de datos.
- **Modelo de distribución.** Selecciona el modelo, use bien graduado para cualquier tipo de análisis de fragmentación.
- **Clases de tamaño.** Intercambia entre los tamaños de malla ISO y US para la traducción de salida de la cartilla.
- **Títulos.** Dos capas de títulos para la salida de gráfico.
- **Registro a archivo (Log to File).** Opción para la salida de análisis de información a un archivo log.
- **Nombre del archivo.** Nombre de un archivo log especificado por el usuario.
- **Objetivo de la calibración.** Objetivo de calibración del valor  $n$  de *Rosin-Rammler*.
- **Densidad de la roca.** Densidad de la roca en  $\text{kg/m}^3$ .
- **Ajuste de  $n$ .** Factor de ajuste multiplicativo para el valor de  $n$  en *Rosin-Rammler*.
- **Ajuste  $X_c$ .** Factor de ajuste multiplicativo para el valor de  $X_c$  en *Rosin-Rammler*.
- **Promedio de tamaños de finos.** Tamaño usado para áreas demarcadas como “áreas de finos”. El nombre de archivo suministrado por el usuario, puede ser de

hasta 4 caracteres de largo y es aportado por una secuencia de números generados por *Wip frag* para identificar en forma única cada imagen y cada análisis.

- **Promedio de tamaños de finos.** Es usado para ingresar el tamaño promedio de finos aplicado a una zona de finos manualmente identificada.
- **Archivos log de salida.** Guarda en un solo archivo las estadísticas generadas por una serie de corridas de *Wip frag*. Cada nueva corrida añade estadísticas a los archivos LOG actualmente seleccionados. Para que esta opción sea activada, el archivo primero debe ser nombrado. Seleccione Archivo Log e ingrese un nombre para el archivo. Para terminar el proceso, hacer clic sobre esta opción una segunda vez y el nombre del archivo será reemplazado por ninguno. Reinicie un nuevo registro de archivo log ingresando un nuevo nombre.
- **Densidad de roca ( $\text{kg/m}^3$ ).** Es una opción usada para convertir áreas 2 D a volúmenes 3D. Note que la densidad de roca tiene un efecto en el log histograma solamente. La normalización en el caso del gráfico acumulativo, elimina el efecto de la densidad de roca. La densidad de roca se espera un valor de densidad apropiado para la roca en la imagen (como tabulado más abajo). Este valor es usado para convertir de volumen a masa y peso.

## 2.7 HIPÓTESIS GENERAL

- Las características geomecánicas de la masa rocosa y la doble iniciación no electrónica nos permitirán optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

### 2.7.1 Hipótesis específico

- Las características geomecánicas de la masa rocosa nos permitirá optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del software Wip frag 2010 en Unidad Minera Apumayo SAC.
- La doble iniciación no electrónica nos permitirá optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

### 2.7.2 Variable independiente

Características geomecánicas de masa rocosa y doble iniciación no electrónica en perforación y voladura en bancos en Unidad Minera Apumayo SAC.

### 2.7.3 Variable dependiente

Optimización de fragmentación de roca en perforación y voladura con apoyo del software Wip frag 2010 en la Unidad Minera Apumayo SAC.

### 2.7.4 Variable interviniente

Tajo Apumayo Sur de la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Kerlinger (2002), sostiene que generalmente se llama diseño de investigación al plan y a la estructura de un estudio, es decir el plan y estructura de una investigación concebidas para obtener respuestas a las preguntas de un estudio. El diseño de investigación señala la forma de conceptualizar un problema de investigación y la manera de colocarlo dentro de una estructura que sea guía para la experimentación (en el caso de los diseños experimentales) y de recopilación y análisis de datos. En efecto, diremos que es un plan, estructura y estrategia de la investigación.

- **Plan.** Se entiende como un esquema general o programa de la investigación.
- **Estructura.** Paradigma llamado también modelo de las operaciones viables.
- **Estrategia.** Métodos para recopilar y analizar los datos, para dar una respuesta a la pregunta de estudio.

### 3.2 TIPO DE LA INVESTIGACIÓN

**Aplicada.** Para lograr nuevos conocimientos que nos permitan soluciones a problemas prácticos respecto a la fragmentación de rocas, al tamaño adecuado como resultado de la voladura.

**Descriptiva.** La población considerada y las muestras que se obtendrán con los datos solo permiten la descripción o identificación de cada uno de los componentes en el proceso de la investigación.

### 3.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

**Descriptivo.** Describe características del macizo rocoso en una circunstancia temporal y geográfica determinada, su finalidad es describir y/o estimar parámetros, se describen frecuencias y/o promedios, y procedimientos de tendencia central, se estiman parámetros con intervalos de confianza, el uso de la doble iniciación no electrónica en la voladura para la optimización de fragmentación de rocas.

**Explicativo.** Explica el comportamiento de una variable en función de otra por ser estudios de causa-efecto requieren control y debe cumplir otros criterios de causalidad,

### 3.4 MÉTODO

Son los procedimientos sistemáticos para lograr el desarrollo de una ciencia, se refiere a las técnicas de como recolectar datos de campo específicamente las características geoestructurales de la masa rocosa, como medir los datos, preparar para la codificación, para que sea de mayor validez y los diferentes instrumentos de medición tales como: la entrevista, el cuestionario, la observación, la encuesta, para viabilizar se presenta un desarrollo bien definido que nos permitirá conocer cada uno de los métodos para recolectar información, estas son las características geomecánicas de la masa rocosa, el

tratamiento de especímenes para someter a pruebas de laboratorio, se vale de la verificación empírica mediante una cuidadosa contrastación de los datos obtenidos en el presente trabajo de investigación directamente del campo de las operaciones de minado en Unidad Minera Apumayo SAC.

### **3.5 POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.5.1 Población**

Es conjunto de todas las observaciones con el establecimiento de la unidad de análisis y su respectiva delimitación, la unidad de análisis puede ser personas, organizaciones, instituciones, en algunos casos cuando se tiene pocas muestras el universo puede ser considerado igual a la muestra, específicamente en caso de la evaluación de las características lito estructurales del macizo rocoso una progresiva o un tramo tiene características particulares el cual es necesarios evaluar uno por uno cada discontinuidad, es decir evaluar todas las discontinuidades existentes considerando la muestra igual a la población y evaluar estadísticamente cada discontinuidad.

#### **3.5.2 Muestra**

Según Velásquez (1999), la muestra es una fracción de la población que cumplan la condición de que con una probabilidad  $P$ , las conclusiones pueden tener validez para todo el Universo, Constituye Un conjunto de unidades o elementos de una población conformada por un grupo de datos seleccionados como representativos, la muestra se obtendrá aplicando la fórmula para cálculo del tamaño de la muestra conociendo la población.

### 3.5.3 Cálculo de tamaño de muestra conociendo el tamaño de la población

Cuando se tiene conocimiento del tamaño de muestra se puede hacer uso de la fórmula:

$$n = \frac{(N)(Z^2_c)(P)(Q)}{D^2(N-1) + (Z^2_c)(P)(Q)}$$

Donde:

N: Población

Z: Nivel de confianza

P: Probabilidad de éxito

Q: Probabilidad de fracaso (Q=1-P)

D: Precisión (Error máximo permisible en términos de proporción).

### 3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Se refiere a la forma de desintegrar y evaluar cada una de la variable en sus indicadores e índices para poder efectuar las mediciones posibles. Ver Tabla 3.1.

### 3.7 INDICADORES E ÍNDICES DE VARIABLES

Se ha realizado de acuerdo a la hipótesis, considerando a la variable independiente se ha considerado a las características geomecánicas y la doble iniciación no electrónica los cuales son determinadas en ítems e índices que se muestran en la tabla adjunta. El mismo procedimiento se realizará con la variable dependiente que es la doble iniciación no electrónica.

**Tabla 3.1.** Operacionalización de variables.

Variables	Dimensión	Indicadores	Índice	Unidad de medida	
<b>1. Variable independiente.</b> Características geomecánicas de masa rocosa y doble iniciación no electrónica en perforación y voladura en bancos en Unidad Minera Apumayo SAC.	Caracterización geomecánica	Índice RMR de <i>Bieniawski</i>	Calidad de macizo rocoso.	Numérico	
	Doble iniciación no electrónica en perforación y voladura	Malla de perforación	dimensiones	m.	
		Escenario N°1: Fragmentación con iniciación no electrónica y carga explosiva en voladura en producción, antes de la optimización.	Iniciación simple no electrónica P80	Pulgadas	
			Doble iniciación no electrónica P80	Pulgadas	
			Carga explosiva	kg.	
<b>2. Variable dependiente</b> Optimización de fragmentación de roca en perforación y voladura con <i>software Wip frag 2010</i> en la Unidad Minera Apumayo SAC.	Toma de imágenes de resultado de voladura y análisis de fragmentación con <i>Wip frag 2010</i>	Optimización del tamaño de fragmentación de roca y análisis de estabilidad e integración de datos en curva granulométrica en <i>Wip frag 2010</i> .	Análisis de estabilidad antes de voladura	Numérico	
			Análisis de estabilidad después de voladura.	Numérico	
			Porcentil P80	Pulgadas	
		Escenario N°2: Tamaño de fragmentación con <i>Wip frag 2010</i> en proceso productivo. Después de la optimización.		Análisis de estabilidad antes de voladura	Numérico
				Análisis de estabilidad después de voladura.	Numérico
				Porcentil P80	Pulgadas
				Porcentil P80	Pulgadas

Fuente. Autor de tesis.

### **3.8 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.8.1 Técnicas de análisis de datos**

Para realizar el análisis de datos es necesario tener consolidado la base de datos es decir la información de la litología estructural del macizo rocoso.

El análisis de los de los datos se realizan para cada caso con sus respectivos gráficos, los resultados de la consolidación de datos nos permite analizar haciendo uso de algoritmos especializados, existen muchas pruebas estadísticas, para el presente trabajo de investigación se pueden hacer uso de T de *student*, la prueba F, la prueba Z, la regresión simple, la regresión múltiple, la correlación.

### **3.9 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

La información que se obtiene en la investigación en ésta etapa del estudio se hará uso de técnicas a la codificación, tabulación (definición de cuadros y gráficas) y cuadros de consistencia para luego realizar el análisis respectivo con el apoyo de un ordenador específico es el software Excel avanzado, Access.

#### **3.9.1 Tabulación**

Se refiere a la construcción de las tablas y Gráficos requerida por el estudio se especificará en cada capítulo con la numeración respectiva y el título correspondiente que facilitará la interpretación del tema correspondiente.

#### **3.9.2 Instrumentos**

Se considera como un recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información, dentro de cada instrumento concreto pueden distinguirse dos aspectos diferentes: forma y contenido. Estos instrumentos facilitarán

obtener una información más adecuada y verídico para posteriormente sintetizar y consolidar la base de datos, los principales instrumentos son:

- Laptops personales.
- Software especializado.
- Formularios.
- Catálogos.
- Brújulas.
- Esclerómetro.
- Estación total.
- Equipos de seguridad minera (EPP).

### **3.10 ASPECTOS ÉTICOS**

En el presente trabajo de investigación se han tomado en cuenta las investigaciones realizadas por otros autores referido perforación, la voladura de roca en minería superficial, en este sentido se mencionará los aportes e cada uno de los investigadores, el tema materia de investigación reconociendo los derechos del autor a cada uno de los autores.

## CAPÍTULO IV

### ASPECTOS GENERALES

#### 4.1 UBICACIÓN Y ACCESO DE PROYECTO APUMAYO

El proyecto Apumayo perteneciente a la Compañía Minera Apumayo S.A.C. Se encuentra ubicado en el departamento de Ayacucho, entre las provincias de Lucanas, en los distritos de Chaviña y Sancos; entre las coordenadas 614,000 E, 8°349,000 N y 618,000 E, 8°344,000 N UTM (PSAD 56, zona 18 S), en el departamento de Ayacucho.

##### 4.1.1 Accesibilidad al proyecto Apumayo

El proyecto Apumayo, es accesible por 2 rutas tal como se observa en Tabla 4.1. y Tabla 4.2 y Figura 4.1 respectivamente.

**Tabla 4.1.** Vía de Acceso al área del Proyecto – Ruta 1.

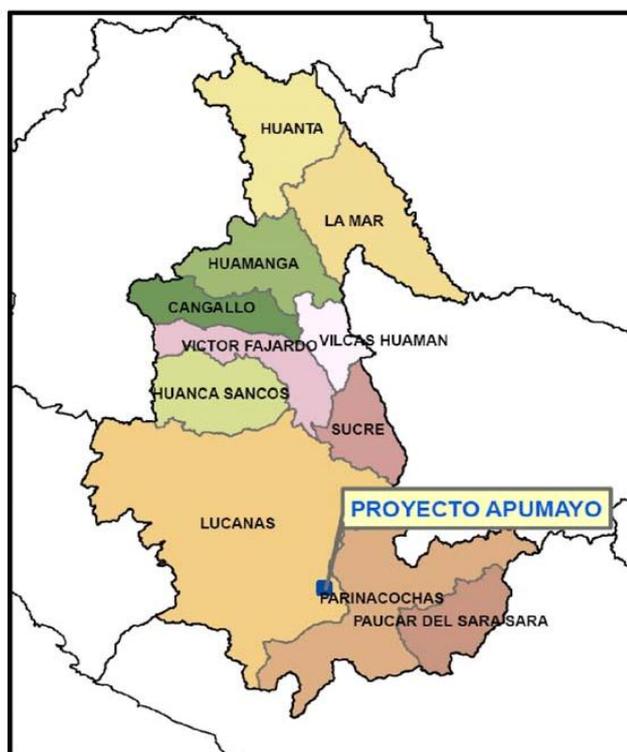
Ruta	km.	Tipo de vía	Tiempo (horas)
Lima - Nazca	444	Asfaltado	06
Nazca – Puquio	157	Asfaltado	03
Puquio – Desvío	58	Afirmada	02
Desvío – Proyecto	13	Trocha Carrozable	0.3
TOTAL	672	---	11.3

Fuente: MTC.

**Tabla 4.2.** Vía de acceso al área del Proyecto – Ruta 2.

Ruta	Km.	Tipo de Vía	Tiempo (horas)
Lima – Arequipa	700	Aérea	01
Arequipa – Imata	145	Carretera Asfaltada	02
Imata - Dv. a Parina	50	Carretera Afirmada	01
Dv. a Parina - Parina	20	Trocha Carrozable	0.75
Parina - Proyecto	10	Trocha Carrozable	0.25
<b>TOTAL</b>	<b>900</b>	<b>---</b>	<b>5.0</b>

Fuente. MTC.



**Figura 4.1.** Ubicación Proyecto Apumayo.

Fuente. U. M. Apumayo SA.

## 4.2 GEOMORFOLOGÍA

Trata las características geomorfológicas más relevantes del área de estudio, describiendo las formas fisiográficas dominantes de su relieve, considerando el origen, pendiente, litología y magnitud de las elevaciones topográficas. También se examinan los procesos erosivos que en la actualidad inciden en su morfología. El estudio tiene como objeto establecer un adecuado marco de conocimiento respecto al relieve en el

área del Proyecto Minero Apumayo, para prevenir cualquier repercusión negativa de las características geomorfológicas sobre el desarrollo de este Proyecto, como a su vez, evitar daños en el medio ambiente y los recursos naturales.

El estudio se basó por un lado en el análisis y fotointerpretación de imágenes de satélite de alta resolución, visualizadas a través del Programa *Google Earth Pro*, de aerofotografías y el examen de cartas fotogramétricas a escala 1: 25 000. Todos estos documentos, examinados en una primera etapa previa de gabinete, proporcionaron bases de observación para las subsiguientes verificaciones que se hicieron en el terreno, tanto en puntos previamente establecidos como en aquellos lugares que se revelaban como de interés en los mismos recorridos.

### **4.3 MORFOGÉNESIS**

El relieve del área refleja la evolución regional reciente de la Cordillera Occidental, la misma que en esta parte sur del país, ha pasado particularmente por una intensa actividad volcánica ocurrida desde el Terciario medio, y que ha persistido hasta tiempos geológicos muy próximos. Esta actividad es la que ha conformado la casi totalidad de los componentes rocosos del área, y a su vez, las diferencias litológicas también presentan incidencias morfogenéticas.

### **4.4 FISIOGRAFÍA**

Este acápite, presenta las características geomorfológicas principales de las formas de relieve que han sido determinadas, las mismas que son agrupadas en dos conjuntos morfológicos sencillos y reconocibles fácilmente por sus notables diferencias de génesis y relieve. En Tabla 4.3 se presentan las formas fisiográficas reconocidas en el área, representadas en el mapa geomorfológico.

**Tabla 4.3.** Unidades fisiográficas presentes en el área de evaluación.

Formas de relieve		Área de Estudio	
		(Ha)	%
Planicies	Terrazas aluviales de valle	52,42	1,09
	Planicies inclinadas de valle (Glacis)	182,98	3,80
	Altiplanicies onduladas	420,26	8,72
Colinas	Colinas ligeramente empinadas	1 887,23	39,15
	Colinas moderadamente empinadas	2 015,19	41,81
	Colinas empinadas	261,87	5,43
TOTAL		4 819,95	100,00

Fuente. Walsh Perú S.A., 2010.

#### 4.4.1 Colinas

Son los relieves cordilleranos ampliamente predominantes del área, que fueron formados por las fases de disección consecutivas al levantamiento andino Plio-pleistocénico. De esta manera, las colinas son los relieves resultantes de la excavación causada por las corrientes de agua actuando en un medio volcánico sub horizontal en proceso de levantamiento, proceso que provocaba el encajonamiento de las corrientes de agua. En el área altoandina del proyecto, los relieves colinosos tienen no más de 200 o 250 m de altura medidos entre las cimas y sus bases, mientras que en zonas cercanas, las colinas quedan bordeadas por relieves mayores, de montañas, de 300 a 500 m de altura, formados también por los mismos procesos de disección. Las pendientes de estos relieves se establecen mayoritariamente entre 10° a 20° como valor predominante para las laderas de las colinas, aunque con una presencia apreciable de sectores de laderas de menor pendiente, y sectores puntuales muy localizados de pendiente mayor, e incluso de pequeños escarpes subverticales.

#### 4.4.2 Rasgos fisiográficos complementarios

El mapa geomorfológico presenta, además de la diferenciación fisiográfica de nivel macro, un conjunto de rasgos fisiográficos complementarios, que ayudan a la descripción y caracterización del relieve. Entre esos rasgos cabe destacar los siguientes:

**Bofedales.** Son sectores característicos de las zonas altoandinas, especialmente de las altiplanicies y fondos de valle, en lugares donde la horizontalidad del relieve, y constitución del suelo, con mayores proporciones de arcilla y materia orgánica, tiende a concentrar las escorrentías provenientes de sectores laterales, y de afloramientos de aguas subterráneas locales, determinando la formación de ambientes hidromórficos, más o menos anegados, de importancia ecológica e hidrológica. Sin embargo, la presencia de bofedales muy puntual y pequeña en el área de estudio (solamente 13,11 ha, o el 0,27 % del área), no habiendo un sólo componente del proyecto que se emplace directamente en estos sectores.

**Divisorias de subcuencas.** Son las líneas que unen los puntos topográficos más altos, que separan laderas hacia una u otra cuenca de colección hidrográfica. Su delimitación en el mapa es importante, porque señala la orientación de los flujos hídricos, hacia los fondos de valle, o hacia las propias zonas donde serán emplazados los componentes del proyecto.

**Afloramientos rocosos.** Son las zonas donde el substrato rocoso aflora en la superficie, no presentando una cobertura de suelos debido a las fuertes pendientes. Estas ocurrencias son frecuentes en toda el área del proyecto, que tiene en general un carácter de superficies de suelos esqueléticos, poco desarrollados y con fuerte presencia rocosa compacta, pero en el mapa sólo se han cartografiado en los sectores donde los afloramientos rocosos se presentan de manera impactante.

#### 4.4.3 Clima y zonas de vida

El área de estudio se halla en su totalidad sobre la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, entre altitudes que van de 3 600 m.s.n.m. a 4 200 m.s.n.m en su nivel inferior hasta en sus partes más altas, configurando de este modo, un medio alto andino de poca diversidad climática, relacionada con la pequeña dimensión del área del Proyecto, y su escasa diferencia de altitud. El estudio se desarrolla a partir de la caracterización de los factores climáticos de orden sinóptico, y también de factores locales.

**Parámetros meteorológicos.** Los datos meteorológicos utilizados proceden de las estaciones; Coracora y Chaviña (sólo como referencia) y Cecchapampa; las dos primeras se encuentran relativamente cerca del área del Proyecto, pero a menor altitud; sin embargo sus datos sirven como referencia para la representación de los caracteres climáticos. La estación Cecchapampa, por su altitud, nos muestra los datos correspondientes a los pisos climáticos propios del área de estudio, tal como se observa en Tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Estaciones Meteorológicas.

Estación	Lat.	Long.	Altitud msnm	Distancia al Proyecto (km)	Parámetro	Registro	Fuente
Coracora	15°00'49"	73°46'51"	3 172	16 km al SE	Precipitación	1966-1975, 1977-1984, 1991-2009	SENAMHI
					Temperatura	1991-2009	
					Humedad Relativa	1991-2009	
Chaviña	14°58'46"	73°49'51"	3 310	9 km al SE	Precipitación	1964-1981	
					Temperatura	1974-1989	
					Humedad relativa	1980-1981	
Cecchapampa	14°49'46"	73°59'52"	3 900	15 km al NW	Precipitación	1968-1982	

Fuente. *Walsh* Perú S.A. – Datum PSAD56.

## 4.5 GEOLOGÍA

El proyecto Apumayo es un yacimiento de tipo ácido sulfato (alta sulfuración) con alteraciones sílice masiva, sílice vuggy-granular, sílice alunita, argílico y propilítica; emplazada en rocas volcánicas de composición andesítica.

### 4.5.1 Geología regional

**Grupo barroso.** Según INGEMMET (1997), el Grupo Barroso comprende las rocas volcánicas posteriores a la Formación Capillune y anteriores a la glaciación pleistocénica; el tope del Barroso marcada por la glaciación cuaternaria ha sido cronológicamente establecida por edades K-Ar entre  $0.7 \pm 0.2$  m.a. Tosdal et al. (1981), correspondiente al Pleistoceno. Se diferencian dos miembros denominados Volcánico Barroso inferior y Volcánico Barroso superior.

**Volcánico barroso inferior.** Los aparatos volcánicos acusan diversos grados de destrucción mayormente a causa de procesos ablativos, Las estructuras volcánicas desarrolladas son del tipo estrato volcán. Está constituido por una alternancia de derrames y piroclásticos; los primeros corresponden a andesitas y traquiandesitas y los segundos a brechas y aglomerados volcánicos. Es pertinente anotar el predominio de los derrames sobre los piroclásticos. Las rocas referidas tienen amplia distribución en el cuadrángulo de Chaviña.

**Volcánico Barroso Superior.** Litológicamente el volcánico Barroso Superior está representado por una secuencia de rocas piroclásticas cuya sección inferior está constituida por intercalaciones de bancos gruesos de tobas soldadas de aspecto masivo y cavidades vacuolares con pómez, granos angulares de cuarzo, biotita, plagioclasas y vidrio volcánico; en conjunto presentan marcada disyunción esferoidal. La roca presenta coloración gris violácea en superficie fresca, variando a

gris claro por intemperismo. Los niveles superiores está compuestos por tobas brechoides de color blanco salmón, cuya masa contiene fenocristales de plagioclasas de 1 a 2 mm y engloba elementos líticos finos angulosos a subredondeados mayormente lávicos.

#### 4.5.2 Geología local

El proyecto está compuesto por 2 prospectos los cuales son: Huamán Loma y Apumayo. Geológicamente está constituida por rocas volcánicas neógenas con dirección NNW-SSE (Morche & Macharé, 1997), asignadas a la Formación Barroso del Plioceno Superior – Pleistoceno. La secuencia volcánica sobreyace discordantemente a la formación Aniso, constituída por secuencias volcano sedimentarias del Mioceno superior. La mayoría de los prospectos que comprende la Región Tambillos (Merino, 2000), se componen de una cúpula silícea calcedónica con su respectiva aureola de alteración que, del centro hacia afuera, varía como sigue: silicificación, argilización avanzada, argilización neta y propilitización; todo ello hospedado dentro de la secuencia volcánica. La geología local está constituido por:

**Stocks y domos dacíticos.** Los domos y stock dacíticos están ubicados al este del C° Cello Ccasa; presentan alineamiento de norte a sur y constituyen la línea de cumbres (Machare 1997). Están constituidos por fenocristales de biotita, plagioclasas, minerales opacos y cuarzo. Por su posición, podemos deducir que se trata de eventos tardíos.

**Lava andesítica.** Es el evento efusivo posterior a la finalización de los eventos explosivos (piroclásticos). Se observa variaciones texturales de las lavas andesíticas que gradan de andesita porfirítica a andesita afanítica, con laminaciones centimétricas que cubren la parte superior del depósito lávico.

**Piroclástico.** Dentro de estos eventos explosivos que depositan materiales piroclásticos, se incluye depósitos de caída que rellenan paleovalles (al oeste del valle Huamán Loma), dentro de los cuales se distingue más de tres unidades de erupción de tufo de lapilli con clastos de pómez y fragmentos líticos (Morche, 1998, Inf. inter.), así como también lapillis acrecionales.

#### 4.5.3 Alteración

- **Argílica:** Se presenta en los bordes de los centros de alteración con un ensamble de caolín (illita y/o esmectita) y pirita.
- **Argílica avanzada:** El ensamble cuarzo-caolín es el ensamble con mayor extensión en todo el proyecto; en el ensamble por lo general predomina el cuarzo, con un contenido de caolín de 20 a 40 %, entre crecido y reemplazando a fenos de feldspatos. El ensamble cuarzo - alunita, la alunita se presenta entrecrecida, reemplazando fenos y rellenando fracturas y probablemente formada en diferentes generaciones.
- **Silicificación.** Se presenta en tres formas; como silicificación masiva compacta, sílice lixiviada granular y sílice opalina, las tres formas están relacionadas a centros de alteración hidrotermal. La alteración afecta la secuencia de lavas andesíticas y tufos del Barroso.

#### 4.5.4 Geología estructural

El estudio de fotointerpretación, realizado por M. Baker (APC, 1996), determinó varios centros de alteración hidrotermal, con alineamientos Norte-Sur y Noroeste - Sureste. El alineamiento Norte - Sur, que incluye los centros de alteración epitermal

desde Piruruyoc hasta Iñahuato (aquí se incluye todo el proyecto Apumayo), estaría relacionado al CVT (Complejo Volcánico Tambillos).

- **Fallas.** Las fallas locales están relacionadas al rumbo de las fallas regionales NW y sus respectivas fallas transversales. Predominan los fracturamientos poli direccionales.
- **Stocks.** Se ubican en el límite norte del centro de alteración epitermal Cello Ccasa. Son intrusiones de forma irregular, con extensión menor a 50 m, sobresaliendo débilmente a la superficie, de composición dacítica, con fenos de feldespatos, biotitas y cuarzo primario.

#### 4.5.5 Reservas minerales

Las reservas de la unidad minera Apumayo han sido actualizadas al 25 de enero 2015 considerando el modelo de recursos los cuales fueron estimados por cuerpos mineralizados de oro y plata.

A partir del modelo de recursos se ha generado un modelo económico de reservas el mismo que ha sido optimizado con la ley equivalente en oro considerando parámetros económicos y técnicos. Las reservas han sido clasificadas en Probadas y Probables, para ello se calculó el *cut off* de 0.15 g/TM Au Eq.

Se tiene como reservas 2, 282,452 TM con 0.28 g/TM Au y 92 g/TM Ag, el desmonte a extraer es 1, 953, 425 TM resultando un *striping* ratio es de 0.86. Se proyecta recuperar 36,659 onzas de Au equivalentes con una recuperación metalúrgica en oro de 89% y plata de 20% en zona de óxidos.

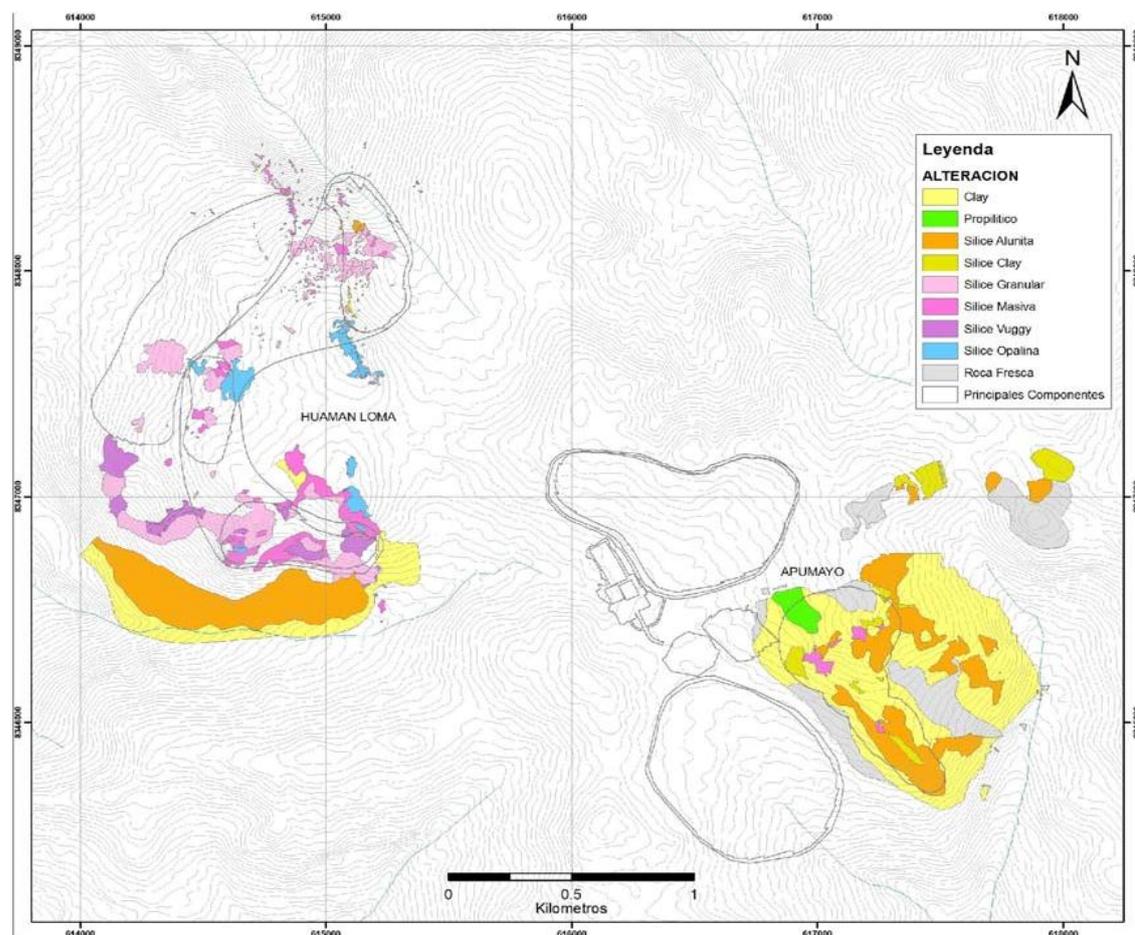
En el sector de Huamán Loma se culminó la extracción de mineral en el mes de noviembre 2014.

En el sector de Ayahuanca se tiene como reservas 3, 653,945 TM con 0.46 g/TM Au, el desmonte a extraer es 4, 566, 384 TM resultando un *striping* ratio es de 1.25. Se proyecta recuperar 49,884 onzas de Au con una recuperación metalúrgica Au de 92% de acuerdo al reporte de la gerencia de planta.

En base al modelo de reservas del tajo Apumayo se ha elaborado el plan de minado a 10,000 TMD.

#### **4.5.6 Tipo de mineral**

El Proyecto Apumayo está compuesto por 2 prospectos los cuales son: Huamán Loma y Apumayo, geológicamente está constituida por rocas volcánicas neógenas con dirección NW-SE (*Morche & Macharé, 1997*), asignadas a la Formación Barroso del Plioceno Superior – Pleistoceno. La mayoría de los prospectos que comprende la Región Tambillos se componen de una cúpula silíceo calcedónica con su respectiva aureola de alteración que, del centro hacia afuera, varía como sigue: Silicificación, argilización avanzada, argilización neta y propilitización, todo ello hospedado dentro de la secuencia volcánica: Ignimbritas, tufos y lavas andesíticas. Ver Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Alteración y control estructural - complejo volcánico tambillos.

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

#### 4.5.7 Estimación de reservas

Las reservas de mineral se han calculado en base al modelo de optimización económica, para ello debido al alto porcentaje de onzas de Ag como subproducto presente en el yacimiento se ha calculado la ley equivalente en oro y empleando parámetros económicos (precio de venta, costos operativos, términos comerciales), recuperaciones metalúrgicas y parámetros geotécnicos (ángulos de talud global).

La optimización de los recursos no considera los inferidos.

En base al modelo optimizado se realizó un diseño del tajo abierto considerando los accesos necesarios de menor distancia y a los parámetros geotécnicos establecidos en el

estudio de estabilidad de taludes de DCR del tajo Apumayo y evaluaciones Geotécnicas del sector sur por parte de Geotecnia Aruntani.

#### 4.5.8 Parámetros económicos de optimización del tajo

En la optimización económica del tajo Apumayo se han considerado el precio de venta y recuperaciones metalúrgicas: Ver Tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Precios de venta y recuperación metalúrgica.

Precios de venta y recuperación metalúrgica	
Precio venta Au US\$/oz	1,200
Precio venta Ag US\$/oz	16.5
Recuperación metalúrgica Au	89
Recuperación metalúrgica Ag	20
Refinería US\$/oz	24.49
Costo de comercialización US\$/oz	15.0

Fuente. Gerencia de Planta-U.M. Apumayo SAC.

Se elaboró el modelo geológico del depósito en base a la reinterpretación del logeo de taladros perforados e interpretados con secciones sistemáticas E-O y N-S, dicho modelo comprende las alteraciones, la litología y la configuración del cuerpo del oro. El Método para el cálculo de reservas está basada en la técnica de interpolación Kriging Ordinario, así como optimización y diseño del pit final a un Cut-Off de 0.16 g/TM Au y 40 g/TM Ag para el tajo Apumayo y para el tajo Huamán Loma en cut-off es de 0.18 g/TM Au.

### 4.5.9 Resumen y detalle de las reservas minerales

En los tajos de Apumayo y Huamán Loma se ha estimado una reserva total de 3,664,982 TM de mineral extraíble con ley promedio de 0.273g/TM de Au de ambas zonas y Ag sólo encontrándose en el tajo Apumayo con ley promedio de 42g/TM, el desmonte total de ambos tajos es de 6,943,780 TM que serán llevados al botadero. La relación desmonte a mineral promedio de ambos tajos es de 1.89. En la Tabla 4.6, 4.7 y 4.8, se muestra el detalle de reserva de mineral por zonas y desmonte generado por cada tajo.

**Tabla 4.6.** Detalle reservas por bancos - Tajo Apumayo.

Banco	Mineral t	Desmonte t	S.R	Au g/t	Ag g/t
4200	0	87,908			
4192	322	301,464	936.09	-	62.41
4184	6,518	533,278	81.82	-	73.12
4176	14,844	711,869	47.96	-	58.96
4168	54,070	905,597	16.75	0.02	54.70
4160	155,836	948,265	6.09	0.12	56.85
4152	428,107	844,078	1.97	0.15	55.75
4144	650,438	602,766	0.93	0.22	50.69
4136	560,308	388,694	0.69	0.28	51.29
4128	494,572	238,661	0.48	0.30	51.31
4120	407,452	113,269	0.28	0.33	45.34
4112	286,526	68,110	0.24	0.39	35.31
4104	88,373	30,647	0.35	0.37	16.27
<b>total</b>	<b>3,147,365</b>	<b>5,781,544</b>	<b>1.84</b>	<b>0.26</b>	<b>48.98</b>

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

**Tabla 4.7.** Estado de reservas por bancos-Tajo Huamán Loma.

Banco	Mineral TM	Desmonte TM	S.R	Au g/TM
4128	74	32,586	441.21	0.26
4120	17	70,054	4,084.30	0.25
4112	10,166	147,060	14.47	0.28
4104	27,431	131,372	4.79	0.43
4096	37,367	120,809	3.23	0.34
4088	25,261	91,660	3.63	0.31
4080	41,607	181,977	4.37	0.29
4072	113,387	175,081	1.54	0.39
4064	102,776	117,005	1.14	0.42
4056	88,274	59,692	0.68	0.36
4048	70,335	18,659	0.27	0.26
<b>Total</b>	<b>517,569</b>	<b>1,161,251</b>	<b>2.24</b>	<b>0.36</b>

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

**Tabla 4.8.** Resumen de reservas minerales.

Resumen de reservas minerales					
Tajo	Mineral_TM.	Desmonte TM.	S.R.	Au_g/TM	Ag_g/TM
Apumayo	3,147,365	5,781,544	1.84	0.26	49.00
Huamán Loma	517,617	1,162,236	2.25	0.36	
TOTAL	3,664,982	6,943,780	1.89	0.27	42.08

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

En Tabla 4.8, se muestra detalle por bancos de las reservas de mineral y desmonte estimados.

#### 4.6 REPORTE DE RESERVAS

Histórico de reservas. Las reservas calculadas correspondientes a los años 2011, 2013, 2014 y 2015 del tajo Apumayo y Huamán loma donde las variaciones se deben a las reinterpretaciones geológica y modificación de las estructuras mineralizadas basados en las campañas de *infill drilling* el cual se observa en Tabla 4.9.

**Tabla 4.9.** Histórico de reservas Tajo Apumayo.

	Reservas - Tajo Apumayo						
	Mineral	Au	Ag	onzas	onzas Ag	Desmonte	S.R
Dic_2011 EIA	16,191,825	0.39	60	203,026	31,182,675	32,117,098	2.0
Sep_2013	3,318,792	0.43	72	45,639	7,633,656	5,164,609	
Dic_2013				1.56			

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

#### **4.6.1 Proceso productivo de la mina**

El proceso productivo de la unidad operativa está controlado a través de un plan de minado que contempla, tonelaje de mineral, desmonte y leyes a explotarse durante la vida de la mina. Para este proceso operacional se tendrá un control en la secuencia de minado del tajo con las principales actividades mineras que se describen a continuación.

### **4.7 OPERACIÓN MINA**

Las operaciones unitarias más importantes dentro del área de operaciones mina son perforación, voladura, carguío y transporte de minerales.

#### **4.7.1 Perforación**

Para la perforación se utilizan 2 perforadoras rotativas DM45, el diámetro de perforación será de 7 7/8" y 9.50 metros de altura total de perforación, el cual incluye 1 m de sobre perforación para obtener un piso uniforme. La malla de perforación dependerá de la dureza de la roca, densidad del material, las mallas que utilizaremos en función de los parámetros técnicos son:

Malla N° 1: 6.1 x 7.0 m – material coluvial.

Malla N° 2: 5.8 x 6.4 m – roca in situ.

Malla N° 3: 5.2 x 6.0 m – roca in situ.

El diseño de la malla de perforación es un factor sumamente importante puesto que cualquier buen resultado de la voladura es mérito de una buena marcación de la malla y su adecuada perforación, además mucho dependerá de una correcta limpieza de las áreas a perforar y señalización. El monitoreo de la operación se realizará día a día a

través de un sistema de control de producción y performance de equipos (velocidad de perforación, fragmentación de rocas por voladura, velocidad de carguío, ciclos de acarreo, TM/h, TM/ciclo, disponibilidad y utilización de equipos, costos unitarios en cada operación unitaria) dirigido por un supervisor. La información obtenida nos permite calcular los rendimientos e identificar desviaciones con respecto a lo planeado y tomar acciones correctivas en el momento.

#### **4.7.2 Voladura**

El objetivo es fragmentar el macizo rocoso a través de agentes de voladura. Los taladros son cargados con aproximadamente 192 kg de material explosivo, haciendo uso de accesorios de voladura se garantiza la mayor seguridad posible y la mejor fragmentación del material.

En lo que respecta a este tema se deberá realizar los siguientes controles: Calibración de camiones mezcladores, medición de densidad de nitrato, medición de dispersiones de faneles y retardos. En lo que respecta al sistema de control y reportes realizados son: Consumo de nitrato y emulsión diario, stock de material disponible en mina (diario), factor de potencia (por disparo), tiempo de demora por disparo de los principales equipos (por disparo), número de disparos semanalmente y tonelaje promedio volado por taladro y total semanalmente.

#### **4.7.3 Carguío**

Para las operaciones de carguío se realizarán mediante el empleo de equipo pes a do tales como : excavadoras cargadores frontales sobre neumático en algunos casos. Estos equipos cargan volquetes de 22 m<sup>3</sup> de capacidad. Los equipos de carguío son:

- 03 Excavadoras CAT 345 - 2. 2 m<sup>3</sup>

- 01 Excavadora CAT 992 - 10.5 m<sup>3</sup>.

#### 4.7.4 Acarreo

Para el acarreo de mineral se utilizaran volquetes de 15 m<sup>3</sup> y 20 m<sup>3</sup> para transportar el mineral del tajo al pad de lixiviación por una rampa con pendiente de 8% y 12 m de ancho. Así mismo, para el acarreo del desmonte se utilizarán volquetes de mayor capacidad de carga para transportar al botadero de desmonte.

Para el acarreo se cuenta con la siguiente flota:

- 07 volquetes operativos para mineral.
- 09 volquetes operativos para desmonte.
- 01 volquetes en stand by.

**Tabla 4.10.** Transporte Mineral al Pad.

Velocidad vuelta	km/h	16
Distancia (ida y vuelta)	km	1.5
Tiempo c arga	min	1
Tiempo descarga	min	1
Tiempo c uadrado, acomodo y espera	min	1.5
Tonelaje	TM	32.5
Resumen		
Ciclo	min	28.86
Producción		
Producción diaria	TM	10,000
Núm. volquetes requerido - mineral	Und.	7
Núm. volquetes requeridos -desmonte	Und.	9

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

#### 4.8 SERVICIOS AUXILIARES

Las vías principales de accesos hacia el tajo abierto, botadero de desmonte y pad de lixiviación serán mantenidas mediante el uso de dos motoniveladoras en conjunto con un camión cisterna para el regado con agua, esto permitirá tener las vías en buen estado y evitar el polvo originado por el paso de vehículos y maquinarias.

Son equipos encargados básicamente de apoyo en las zonas de carguío; nivelación de pisos, acumulación de material para alimentar a los equipos de carguío, limpieza de frentes, en las zonas de acceso limpieza de vías, construcción de bermas, construcción de accesos, regado de vías y en las zonas de descarga empuje de material y nivelación de pisos. Para ello contaremos con: tractores de oruga, motoniveladoras y cisternas de agua, a continuación se detalla la lista de equipos a usar:

- 1 Tractor oruga Marca KOMATSU modelo D155AX-5B.
- 1 Tractor Oruga CAT modelo D8R.
- 1 Tractor Oruga CAT modelo D6R LGP.
- 1 Motoniveladora Champions modelo 720
- 1 Cisterna de agua para operaciones.
- 1 Cisterna para regar vías (5,000 gal.).
- 1 Cisterna de combustible (3,000 gal.).

#### 4.8.1 Relación de equipos

El equipo minero necesario se detalla en Tabla 4.11, y Tabla 4.12.

**Tabla 4.11.** Equipo de Operaciones Mina.

Equipos	Cantidad
Excavadora Hitachi 1800	1
Excavadoras CAT 345	1
Excavadora CAT 330	1
Tractores CAT D8R	2
Perforadoras rotativas DM45	2
Camiones - Volquetes	33

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

**Tabla 4.12.** Equipo de Operaciones Auxiliares Mina.

Camión cisterna para regar vías (5,000 gal.)	2
Motoniveladora Champion	2
Cisterna - combustible (3,000 gal)	1
Camionetas doble tracción - supervisión	6
Rodillo	1
Buses para transporte de personal	4
Camión fábrica ANFO	1

Fuente U.M. Apumayo S.A.C.

#### 4.8.2 Planta

El área de tratamiento metalúrgico comprende básicamente el área del *Pad* de lixiviación y la planta de recuperación *Merril Crowee inclusive* instalaciones conexas como pozas de solución rica (PLS), intermedias (ILS) la poza de grandes eventos, laboratorio, almacén de cianuro, cal y otros insumos.

#### 4.8.3 Pad de lixiviación

El *pad* es una superficie de terreno preparada convenientemente, con estudios geotécnicos, para soportar el volumen de mineral que se está cargando, el piso es una superficie cubierta con arcilla compactada de 30 cm de espesor, de bajísima permeabilidad la cual recibe una capa de geomembrana de polietileno del tipo HDPE de 1.5 mm de espesor, ésta capa es protegida con una capa de material llamado *over liner*, para evitar su deterioro cuando se descarga el mineral sobre ella. Se cuenta con tuberías subterráneas para conducción de aguas subterráneas y tuberías de colección de las soluciones que drenan del *pad* y son conducidos a las pozas.

El diseño del *pad* considera un piso inclinado de modo que toda la solución drenará hacia una única salida, el *pad* está protegido contra las escorrentías de agua por lluvias, por canales de coronación que rodean las partes superiores del *pad* cuyo objetivo es conducir las aguas de lluvias, hacia la parte baja del *pad* en forma controlada, evitándose de esta forma el ingreso de esta agua al interior del *pad*.

La capacidad de carguío y transporte de mineral hacia el *pad* será de 15,000 TM de mineral por día. Las operaciones en el *pad* de lixiviación se realizarán mediante el apilamiento de mineral en capas de 10m de altura, 13 capas en total, las capas serán lixiviadas en ciclos de 80 días de riego.

La solución rica que drena del *pad*, es almacenada en la poza de solución rica (PLS), que tiene doble revestimiento de geomembrana, de esta poza se alimenta la solución a la planta *Merrill Crowe*, para este objetivo se utilizará bombas sumergibles.

Las soluciones que drenarán del *pad* y que proceden de zonas gastadas (que tienen un tiempo considerable de lixiviación), y que por lo tanto tienen leyes bajas en oro, son derivadas a la poza intermedia (ILS), desde donde por bombeo se recircula directamente al *pad*, para elevar su ley en el proceso de lixiviación.

#### 4.8.4 Pozas

Para la capacidad de tratamiento del mineral proyectado será necesario la construcción de 2 pozas para el almacenamiento y procesamiento de la solución colectada en el *pad* de Lixiviación, una poza para el almacenamiento de la solución rica o PLS, y otra para el almacenamiento de la solución intermedia o ILS.

La poza de solución rica o (PLS); su función de esta poza es captar y almacenar la solución enriquecida de lixiviación, es decir la solución rica que contiene oro y plata en forma de un complejo soluble en medio alcalino. La poza de solución rica será diseñada para contener la solución de 12 horas de proceso, cuya capacidad es de 11,000 m<sup>3</sup> y está equipada con sistema de control de fugas. La solución enriquecida lixiviada fluye por gravedad desde las pilas de lixiviación a la poza de solución rica. El revestimiento de esta poza será de doble capa de geomembrana. Esta solución será recirculada al *pad* de lixiviación. Las capacidades antes indicadas para las pozas de PLS/ILS serán suficientes para cubrir los requerimientos operativos de producción de soluciones.

La poza de solución intermedia (ILS); las soluciones que darán al *pad*, que proceden de las zonas que ya están lixiviadas y próximas a terminar su etapa de lixiviación y que por lo tanto tienen leyes bajas en oro, son derivados a la poza intermedia, esta poza tendrá una capacidad de 10 000 m<sup>3</sup>, también estará diseñada para contener la solución de 12 horas de proceso y estará equipada con un sistema de monitoreo de posibles fugas. El revestimiento de esta poza es de doble capa de geomembrana HDPE.

#### 4.8.5 Producción tajo Apumayo

La producción realizada en el tajo Apumayo se resume en el siguiente cuadro:

**Tabla 4.13.** Producción Mina – Enero 2015.

	MINER			DESMONT	ONZAS		
	t	Au	Ag	E	Au	Ag	
Año- 2012	25,822	0.674	70	756,870	559		29.3
	2,275,580	0.436	59	9,216,065		57,8	1
					17		
<b>Año-</b>	<b>299,872</b>	<b>0.211</b>	<b>80</b>	<b>456,949</b>	<b>2,039</b>		<b>1.5</b>
<b>TOTAL</b>	<b>5,760,626</b>	<b>0.341</b>	<b>71</b>	<b>16,661,34</b>	<b>63,064</b>		<b>2.8</b>

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

#### 4.8.6 Diseño de tajo

Para el diseño del tajo final se han determinado parámetros y características principales en base a la información actualizada a la fecha, para este diseño se apoyó con un software geológico - minero, ingresando parámetros técnicos y económicos utilizando el método Lerch and Grossman. En Tabla 4.14, se muestra los factores de seguridad de taludes generales finales y en la Tabla 4.15, se muestran los parámetros generales de diseño de los tajos, estudio de estabilidad de taludes de los tajos Apumayo y Huamán Loma.

**Tabla 4.14.** Factores de seguridad de taludes generales finales.

Área	Tajo	Sector de diseño	Sección de análisis	Altura de talud (m)	Angulo de talud		Factor de Seguridad			
					Inter-rampa	General	Estático		Seudoestático	
							drenado	no drenado	drenado	no drenado
Apumayo	APU	I	A-A`	205	43	36	4.651	1.472	1.202	1.057
		II	C-C`	225	46	40	1.194	1.07	0.877	0.787
		III	B-B`	185	45	41	1.294	1.275	0.943	0.945
		IV	B-B`	95	45	35	1.275	1.442	1.165	1.034
		V	D-D`	80	48	44	1.586	1.465	1.098	1.095
		VI	E-E`	100	49	43	1.475	1.546	1.223	1.157
		VII	D-D`	110	45	41	1.632	1.596	1.183	1.182
	HLM	I	A-A`	75	42	38	2.159	1.995	1.598	1.456
		II	B-B`	70	45	41	2.242	2.122	1.673	1.601
		III	C-C`	93	46	43	1.499	1.384	1.117	1.049
		IV	A-A`	40	46	46	1.855	1.838	1.380	1.365

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

**Tabla 4.15.** Parámetros del Diseño de Tajo Apumayo y Huamán Loma.

Parámetros de diseño de Apumayo U. Huamán Loma	
Ancho de rampa	12m
Gradiente de rampa	10%
Altura de banco	8 m
Ancho de berma	4.27 m

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

#### 4.8.7 Estrategias de minado

Teniendo en cuenta las características mineralógicas, morfogenéticas y geotécnicas del yacimiento, el método de explotación que actualmente se viene desarrollando en la mina es de tajo abierto con sistema de bancos (de arriba hacia abajo); cual se realiza igualmente en base a las especificaciones técnicas de minado (volumen, velocidad, equipos y otros). Las operaciones mineras, se ejecutan de modo progresivo y sistemático, de conformidad con el plan de minado, la secuencia de minado permitirá

manejar adecuadamente el desmonte proveniente del desbroce de los pits y evitar mayores costos por transporte. La secuencia de minado de los tajos es: paralelamente se están explotando, el tajo Huamán Loma termina su explotación en un lapso de 04 meses luego quedara solo el tajo Apumayo hasta su culminación.

#### **4.8.8 Programa de minado**

Se ha estimado un total de 3,664,982 TM de mineral extraíble con ley promedio de 0.27g/TM de Au y 42.08g/TM de Ag sólo en el tajo Apumayo y 6,943,780 TM de desmonte de los tajos Apumayo y Huamán Loma, que serán llevados al botadero. La relación desmonte a mineral es de 1.89.

#### **4.8.9 Control del plan de minado**

Para el control de plan de minado el área de planeamiento se divide en dos áreas importantes tales como áreas de largo plazo y de corto plazo respectivamente.

Largo Plazo. Estará encargado de realizar el cálculo de reservas y reevaluaciones del modelo geológico, según el avance de minado y con datos actualizados de los taladros de voladura (blast holes). Así también elaborar optimizaciones de pits a diferentes precios y costos de minado, como el diseño y rediseño de los pits finales económicos, botaderos y pads de lixiviación. Elaborar planes a largo plazo tanto del tajo, botaderos y pads de lixiviación.

Corto Plazo. Elaborar planes mensuales, indicando volumen, tonelaje y ley proyectada para el mes, teniendo en cuenta el promedio de contenido fino mensual establecido por el planeamiento a largo plazo. Hacer el seguimiento de los planes a largo plazo para que se cumpla el plan año a año. Coordinaciones de producción de todas las áreas para evaluar planes mensuales, semanales y diarios.

Reporte diario de producción. Coordinar con las áreas de Mina, Geología, Mantenimiento y *pads* de lixiviación para cumplir con los cronogramas establecidos según minuta mensual y semanal. Coordinar trabajos de topografía para las operaciones y levantamientos topográficos, demarcación de polígonos, proyectos, celdas de llenado y actualizaciones diarias de las zonas del tajo, botaderos y *pads* de lixiviación.

#### **4.8.10 Botadero de desmante**

El diseño considera la construcción de dos botaderos de desmante de ambos sumando una capacidad de 6,943,780 m<sup>3</sup> de desmante. El botadero "Apumayo" está ubicado al Sur del pad de lixiviación y pozas. El botadero de Huamán Loma está ubicado al Noreste del pad de lixiviación. La operación de los botaderos se desarrollara mediante el almacenamiento de desmante procedente de las labores de mina del tajo del sector Apumayo y Huaman Loma. La colocación del material en los botaderos se efectuará al volteo. El botadero "Apumayo" deberá ser cargado hasta la elevación 4,244 m s n m y el botadero "Huaman Loma" deberá ser cargado hasta la elevación 4,192 m s n m, empleando bancos intermedios de 8m de altura, con taludes intermedios de 1.3H:1V, generando un talud global de 2.5H:1V. Con esta configuración se obtiene una capacidad de almacenamiento máxima de 20.0 y 10.57 millones de toneladas métricas respectivamente.

### **4.9 PLAN DE MINADO**

#### **4.9.1 Plan de producción Apumayo 2015**

Ver Tabla 4.16.

**Tabla 4.16.** Plan de producción de Apumayo 2015.

	Unidad	Real	Plan 2015								
		ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	
<b>3.1 Apumayo</b>											
Mineral	t	299,872	310,000	280,000	310,000	300,000	310,000	300,000	310,000	162,452	
Desmorte	t	456,949	496,000	420,000	310,000	300,000	155,000	150,000	77,500	44,925	
SR		1.5	1.6	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.3	0.3	
Ley de Au	g/t	0.21	0.22	0.25	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	
Ley de Ag	g/t	80	82	79	83	91	95	104	112	88	
Au Depositado	oz	2,039	2,193	2,251	2,691	2,701	2,930	2,845	3,040	1,649	
Ag Depositado	oz	772,878	817,271	711,174	827,238	877,715	946,839	1,003,103	1,116,273	461,082	
Rec Au %	%	52%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	
Rec Ag %	%	16%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	
Au Producido	oz	1,060	1,951	2,003	2,395	2,404	2,608	2,532	2,705	1,468	
Ag Producido	oz	120,739	163,454	142,235	165,448	175,543	189,368	200,621	223,255	92,216	

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

El *striping* ratio en el tajo Apumayo se reducirá progresivamente y para darle continuidad a la operación se proyecta iniciar la preparación del tajo Ayahuanca (desbroce) en el mes de junio 2015, el plan de producción se puede observar en Tabla 4.16.

Garantizar en obtener los permisos de minado del tajo Ayahuanca en las fechas mencionadas para evitar desfases en la producción de finos en la planta de Apumayo. Mejorar la confiabilidad del proceso de chancado para evitar contingencia en la producción idónea de mineral al pad, mantener y/o mejorar la recuperación metalúrgica de Ag por ser el principal mineral generador de ingresos en el tajo Apumayo Sur. Definir la capacidad de recepción del pad y botadero con las reservas actualizadas para evitar contingencias en el cumplimiento del plan y proyectar las inversiones a ejecutar.

#### 4.9.2 Plan de llenado del botadero de desmorte

En Tabla 4.17 se muestra el plan de llenado de los botaderos.

**Tabla 4.17.** Plan de llenado de botaderos Apumayo y Huamán Loma.

SECTOR	Años Vida	Desmorte T M
APUMAYO	1	372,775
	2	585,000
	3	604,500
	4	585,000
	5	658,148
	6	930,000
	7	600,000
	8	465,000
	9	360,000
	10	250,000
	11	217,000
	13	176,400
	14	7, 941
	<b>Sub total</b>	
H. LOMA	1	15,7325
	2	262,500
	3	379,750
	4	189,000
	5	90,617
<b>Sub total</b>		<b>1,079,192</b>
<b>TOTAL</b>		<b>6,890,507</b>

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

Considerando la secuencia de extracción del tajo Apumayo durante 3.2 años y seguidamente el tajo Huamán Loma con una vida de 1.1 años, se ha elaborado la secuencia de llenado de los botaderos de material de desmorte de Apumayo y Huamán Loma. Una vez terminada la explotación del pit hasta su límite final se procederá a realizar el cierre progresivo y disminuir la distancia de acarreo de desmorte.

#### 4.9.3 Plan de monitoreo de estabilidad física de botaderos, pad y pozas

Para garantizar el control de la estabilidad de taludes del botadero de desmorte, se ha determinado monitorear mediante un sistema geotécnico de control como son: piezómetros, inclinómetros y topográficos. Los piezómetros permiten evaluar las variaciones del nivel freático en una zona específica y los inclinómetros

permitirán medir los desplazamientos que pudieran ocurrir como resultado del apilamiento de mineral en las capas siguientes. En Tabla 4.18 se observan las frecuencias de monitoreo geotécnico

**Tabla 4.18.** Frecuencias de Monitoreo Geotécnico.

Instrumento	Frecuencia	
	Estación lluviosa	Estación seca
Inclinómetro	Dos veces por mes	Una vez al mes
Piezómetros hidráulicos	Dos veces por mes	Una vez al mes
Hitos topográficos	Cuatro veces por mes	Dos veces al mes

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

Después del primer año de monitoreo se podrá disponer de datos acerca del comportamiento de las instalaciones. A partir de estos datos y si se requiere deberán realizar los ajustes respectivos en el diseño de las sucesivas etapas de expansión, de modo de mejorar la estabilidad global de la pila de lixiviación. Asimismo, los datos del primer año de monitoreo permitirán definir la necesidad de la instalación de la instrumentación en los años subsiguientes.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

#### 5.1 EXPOSICIÓN DE RESULTADOS DE ACUERDO A HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

En el presente proyecto de investigación, se tomará en cuenta tres aspectos fundamentales que son necesarios estas son: Humanos, económicos y físicos, además se requiere de la dotación de la logística para el cumplimiento de las actividades dentro del tiempo establecido.

##### 5.1.1 Resultados estadísticos de acuerdo a hipótesis

En el presente trabajo de investigación se ha realizado los trabajos y los resultados se muestran para demostrar la hipótesis planteada.

**Hipótesis general.** Las características geomecánicas de la masa rocosa y la doble iniciación no electrónica nos permitirán optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

### **Hipótesis específicos**

- Las características geomecánicas de la masa rocosa nos permitirá optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.
- La doble iniciación no electrónica nos permitirá reducir la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

#### **5.1.2 Resultados estadísticos de acuerdo a los objetivos**

Los resultados estadísticos se muestran conforme los objetivos y de acuerdo al estudio y evaluación de los indicadores de cada variable conforme a la metodología de investigación.

### **Objetivos específicos.**

- Determinar las características geomecánicas de la masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC.
- Optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con apoyo *software Wip frag 2010* en Unidad Minera Apumayo SAC.

#### **5.1.3 Metodología de investigación de acuerdo a los indicadores de cada variable**

- Recolección de la información de campo (discontinuidades).
- Evaluación estadística (mapeo geomecánico).

- Post proceso con software geomecánico (Dips).
- Perforación.
- Voladura.
  - Toma de imágenes de voladura y Post proceso con *Wip frag* 2010.
  - Tamaño de fragmentación con iniciación simple no electrónica con *Wip frag* 2010.
  - Escenario N°1: Tamaño de fragmentación con doble iniciación no electrónica con *Wip frag* 2010 antes de la optimización.
  - Optimización de fragmentación con *Wip frag* 2010.
  - Escenario N°2: Fragmentación en proceso productivo con *Wip frag* 2010 después de la optimización.

**Variable independiente.** Características geomecánicas de masa rocosa y doble iniciación no electrónica en perforación y voladura en bancos en Unidad Minera Apumayo SAC.

**Variable dependiente.** Optimización de fragmentación de roca en perforación y voladura con apoyo del *software Wip Frag* 2010 en la Unidad Minera Apumayo SAC.

## 5.2 EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DE VARIABLES

La evaluación de los indicadores se ha realizado considerando la variable independiente y variable dependiente:

- Evaluación de los indicadores de la variable independiente.
- Evaluación de los indicadores de la variable dependiente.

### 5.2.1 Evaluación de los indicadores de la variable independiente

Ver Tabla 5.1

**Tabla 5.1.** Indicadores de variable independiente.

	Indicadores	índice	Unidad de
Variable independiente	Indice RMR de	Calidad de macizo rocoso.	Numérico
	Malla de perforación	Dimensiones	m.
	Escenario N°1:	Iniciación simple no electrónica	Pulgadas
		Doble iniciación no electrónica	Pulgadas
	Fragmentación con iniciación no electrónica y carga explosiva en voladura en producción, antes de la optimización.	Carga explosiva	Kg.

Fuente. Autor de tesis

### 5.2.2 Índice RMR de Bieniawski 1989 mediante la caracterización del macizo rocoso en tajo Apumayo Sur

**Mapeo geomecánico.** Según Mamani (2016), Mapeo geomecánico Texto Guía académico de la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas. El mapeo geomecánico es la representación de las características de la estructura del macizo rocoso en un plano topográfico y geológico, local y regional, siendo el objetivo de establecer un modelo estructural global de la mina, abarcando aspectos tales como, estructura del macizo, litología, contactos y distribución de litologías, geomorfología, cartografía geológica, estudio hidrogeológico, técnicas geofísicas, sondeos, ensayos in situ, de laboratorio, clasificaciones geomecánicas, entre otros, convirtiéndose la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento para determinar su calidad mediante RMR. La

caracterización geomecánica de los macizos rocosos, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (*Palmstrom, 1998*). Ver Tablas 5.2, hasta 5.9 y Figuras 5.1 hasta 5.30.

**Tabla 5.2.** Registro de discontinuidades-mapeo geomecánico de RMR de Bieniawski - Tajo Apumayo Sur.

REGISTRO LINEAL SUPERFICIAL		UNIDAD MINERA APUMAYO SAC-ÁREA OPERACIÓN MINA												SUPERVISIÓN			
		<p style="text-align: center;"><b>APUMAYO APUMAYO SAC</b></p> <p style="text-align: center;"><b>GEOLOGÍA Y GEOMECÁNICA</b></p>														<p>Ing°.A. Benavides</p>	
Progresiva: 00-23 m		PROYECTO: TAJO DE PRODUCCION U.M. APUMAYO SAC.														Hoja N°: 001	
Inclinac   Azimut		MAPEO GEOMECANICO SUPERFICIAL DE RMR DE BIENIAWSKI-PROGRESIVA 00-23 m														Ejecutado por:	
04°		TIPO DE ROCA: Andesita alterada (sílice masiva granular y alunita)														Fecha:	
Discontinuidad N°	Distancia de Intersección de la discontinuidad (m)	Tipo de estructo	Orientación	Espaciado (mm)	Persistencia (m)	Terminación	Apertura(mm)	Rugosidad	Relleno		Ondulación	Meteorización	Agua subterránea	N° de juntas con similares propiedades	P. Inicio		
									Tipo	Esesor							
1	0.38	J	88 97	2	1	1	3	2	2	4	3	3	1	1			
2	0.51	J	86 206	2	2	2	2	2	3	4	2	2	1	1			
3	0.79	J	84 256	3	3	1	3	2	1	3	2	3	1	1			
4	0.89	J	61 23	2	4	2	4	2	2	2	2	2	1	1			
5	0.99	J	82 99	3	3	1	5	2	2	1	2	3	1	1			
6	1.22	J	87 209	4	2	1	4	3	2	1	3	3	1	1			
7	1.30	J	88 256	3	5	2	3	3	3	2	2	3	2	1			
8	1.42	J	60 35	4	4	2	2	4	3	1	3	4	1	3			
9	1.68	J	83 95	3	3	3	1	3	3	2	2	5	1	1			
10	2.00	J	86 212	4	2	2	2	4	2	3	2	4	2	1			
11	2.36	J	87 260	5	2	1	3	5	3	4	3	3	2	1			
12	2.89	J	63 39	4	3	1	4	4	3	4	2	2	3	2			
13	3.64	J	85 90	3	4	3	5	3	3	4	1	1	2	2			
14	4.02	J	81 214	2	3	2	4	2	2	4	3	1	1	1			
15	4.23	J	87 265	2	2	2	3	1	1	5	2	1	2	2			

Fuente: Autor de tesis.

**Tabla 5.3.** Sinopsis de registro lineal de RMR de *Bieniawski* - Tajo Apumayo Sur.

Sinopsis de registro lineal de 4 familias de discontinuidades - Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	DIP DIR (Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
1	88	97	1	2	1	3	2	4	3	1
2	86	206	2	2	2	2	2	4	2	1
3	84	256	3	3	3	3	2	3	3	1
4	61	23	4	2	4	4	2	2	2	1
5	82	99	1	3	3	5	2	1	3	1
6	87	209	2	4	2	4	3	1	3	1
7	88	256	3	3	5	3	3	2	3	2
8	60	35	4	4	4	2	4	1	4	1
9	83	95	1	3	3	1	3	2	5	1
10	86	212	2	4	2	2	4	3	4	2
11	87	260	3	5	2	3	5	4	3	2
12	63	39	4	4	3	4	4	4	2	3
13	85	90	1	3	4	5	3	4	1	2
14	81	214	2	2	3	4	2	4	1	1
15	87	265	3	2	2	3	1	5	1	2
16	70	38	4	3	1	4	1	4	2	1
17	87	88	1	3	2	3	1	3	3	1
18	79	207	2	3	3	2	2	2	2	1
19	86	267	3	4	4	3	3	1	1	1
20	69	35	4	3	2	4	4	1	2	2
21	85	90	1	3	2	3	3	1	3	2
22	72	199	2	4	3	3	2	1	4	1
23	82	269	3	3	2	3	3	1	5	2
24	74	37	4	4	3	4	4	2	4	1
25	80	90	1	3	4	3	3	3	3	1
26	69	192	2	4	3	2	3	2	2	1
27	87	270	3	3	2	2	3	3	3	1
28	68	36	4	3	3	3	3	4	4	1
29	78	92	1	4	2	4	3	3	5	2
30	65	189	2	2	2	3	3	2	4	1
31	87	272	3	3	2	4	3	1	3	2
32	69	29	4	4	2	3	4	1	3	3
33	79	87	1	5	2	4	3	2	3	1
34	56	189	2	1	3	3	2	3	3	5
35	86	277	3	2	2	4	3	4	4	4
36	65	20	4	1	3	4	4	5	3	3
37	82	93	1	2	4	3	3	4	2	2
38	59	194	2	3	5	3	3	3	2	1
39	87	280	3	4	4	3	3	2	2	2
40	58	19	4	3	3	3	3	1	2	3
41	78	97	1	2	2	2	4	2	3	1
42	67	186	2	3	3	3	5	3	4	3
43	87	273	3	4	4	4	4	4	5	2
44	51	15	4	5	3	5	3	3	4	1
45	75	100	1	4	2	4	4	2	3	2
46	74	191	2	3	3	3	3	3	4	3
47	82	270	3	4	4	2	4	4	5	4
48	56	18	4	3	3	3	4	3	4	3
49	76	106	1	2	2	4	4	2	3	2
50	76	193	2	3	3	5	4	1	2	1

Fuente. Autor de tesis.

**Tabla 5.4.** Sinopsis de registro lineal de RMR de Bieniawski - Tajo Apumayo Sur. Continuación.

Sinopsis de registro lineal de 4 familias de discontinuidades - Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	(Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
51	78	267	3	4	4	4	3	2	3	2
52	46	26	4	3	2	3	3	2	4	3
53	66	104	1	4	3	2	4	3	3	2
54	85	193	2	5	4	1	4	3	2	2
55	76	264	3	4	3	2	4	3	1	2
56	66	30	4	3	2	3	4	3	2	2
57	63	97	1	4	2	4	3	3	3	2
58	87	194	2	3	3	3	3	3	4	2
59	73	259	3	4	4	2	3	3	3	1
60	59	27	4	3	5	2	4	3	2	2
61	60	85	1	4	4	1	4	3	1	1
62	80	193	2	3	3	2	4	4	2	1
63	64	251	3	3	2	3	4	4	3	1
64	67	26	4	3	1	4	3	5	4	2
65	55	90	1	4	2	3	4	4	3	2
66	70	194	2	4	2	3	3	3	2	2
67	50	251	3	3	4	2	4	2	1	2
68	71	24	4	3	3	3	5	3	2	1
69	50	97	1	3	2	4	4	3	3	1
70	66	199	2	3	3	3	3	3	4	1
71	40	254	3	3	3	3	3	4	5	2
72	71	20	4	4	2	3	2	3	4	1
73	70	105	1	5	2	2	1	4	3	2
74	72	208	2	4	2	2	2	3	4	1
75	41	268	3	3	2	2	5	4	3	1
76	72	14	4	2	4	1	4	4	4	3
77	65	107	1	3	2	2	3	4	4	2
78	64	196	2	4	2	3	2	4	4	1
79	34	275	3	5	2	4	1	4	4	2
80	75	5	4	4	2	2	1	4	4	1
81	60	89	1	3	3	1	2	4	5	2
82	57	192	2	2	2	2	5	5	4	1
83	44	271	3	4	3	3	5	4	3	2
84	83	5	4	3	3	2	4	3	4	2
85	61	90	1	2	3	3	3	2	5	3
86	53	191	2	1	2	4	2	1	4	1
87	54	278	3	2	3	5	1	2	3	3
88	82	10	4	3	2	4	2	3	3	2
89	78	87	1	2	3	3	1	2	3	1
90	61	195	2	3	2	4	1	1	2	2
91	61	276	3	4	2	3	1	2	1	3
92	69	13	4	3	2	2	1	3	2	2
93	77	83	1	4	2	3	2	4	2	1
94	48	198	2	3	3	4	3	3	3	1
95	65	275	3	2	4	3	4	2	4	2
96	66	12	4	3	3	2	5	2	3	3

Fuente. Autor de tesis.

**Tabla 5.5.** Sinopsis de registro lineal de RMR de *Bieniawski* Tajo Apumayo Sur. Continuación.

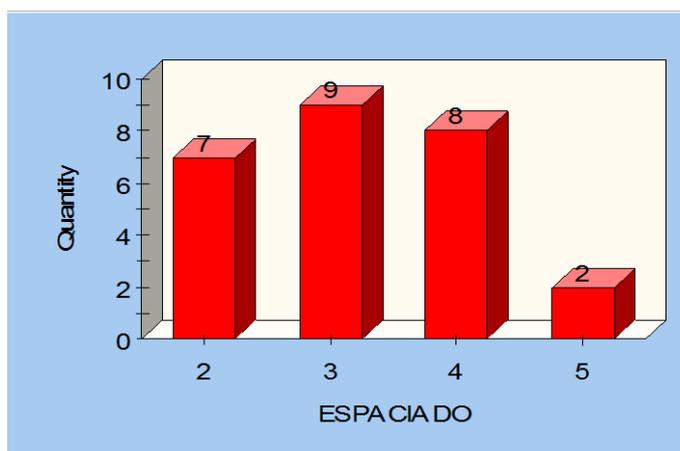
Sinopsis de registro lineal de 4 familias de discontinuidades - Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
97	73	89	1	2	2	3	4	2	2	2
98	52	206	2	3	3	2	4	2	3	1
99	69	281	3	4	4	2	4	1	4	2
100	48	14	4	3	3	3	4	1	3	3
101	68	84	1	4	2	2	3	1	3	4
102	58	207	2	5	2	3	2	2	1	1
103	71	272	3	4	2	2	3	3	2	2
104	44	22	4	3	3	3	2	4	2	1

Fuente. Autor de tesis.

**Tabla 5.6.** Sinopsis de registro lineal de familia 1 Tajo Apumayo Sur.

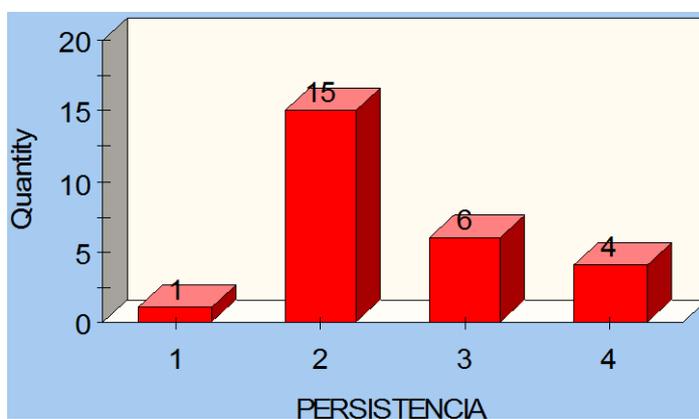
Sinopsis de registro lineal de familia 1- Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
1	88	97	1	2	1	3	2	4	3	1
2	82	99	1	3	3	5	2	1	3	1
3	83	95	1	3	3	1	3	2	5	1
4	85	90	1	3	4	5	3	4	1	2
5	87	88	1	3	2	3	1	3	3	1
6	85	90	1	3	2	3	3	1	3	2
7	80	90	1	3	4	3	3	3	3	1
8	78	92	1	4	2	4	3	3	5	2
9	79	87	1	5	2	4	3	2	3	1
10	82	93	1	2	4	3	3	4	2	2
11	78	97	1	2	2	2	4	2	3	1
12	75	100	1	4	2	4	4	2	3	2
13	76	106	1	2	2	4	4	2	3	2
14	66	104	1	4	3	2	4	3	3	2
15	63	97	1	4	2	4	3	3	3	2
16	60	85	1	4	4	1	4	3	1	1
17	55	90	1	4	2	3	4	4	3	2
18	50	97	1	3	2	4	4	3	3	1
19	70	105	1	5	2	2	1	4	3	2
20	65	107	1	3	2	2	3	4	4	2
21	60	89	1	3	3	1	2	4	5	2
22	61	90	1	2	3	3	3	2	5	3
23	78	87	1	2	3	3	1	2	3	1
24	77	83	1	4	2	3	2	4	2	1
25	73	89	1	2	2	3	4	2	2	2
26	68	84	1	4	2	2	3	1	3	4

Fuente. Autor de tesis.



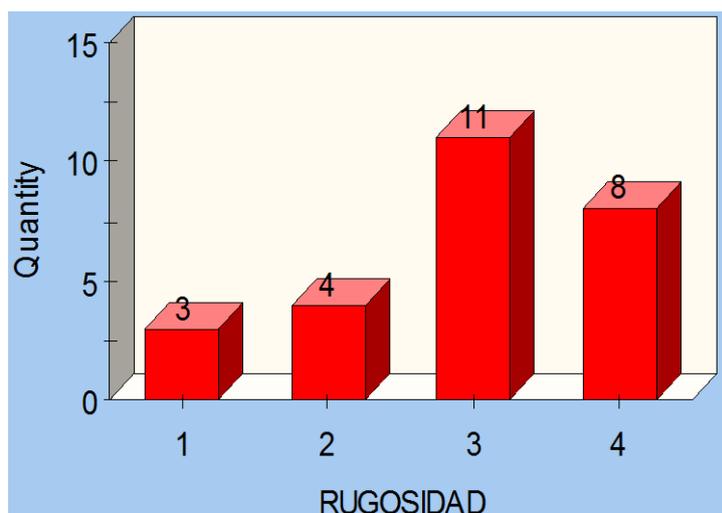
**Figura 5.1.** Histograma de espaciado de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.



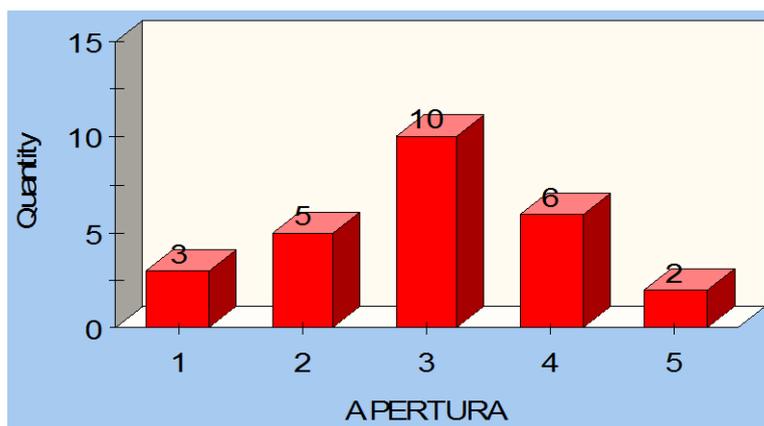
**Figura 5.2.** Histograma de persistencia de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.



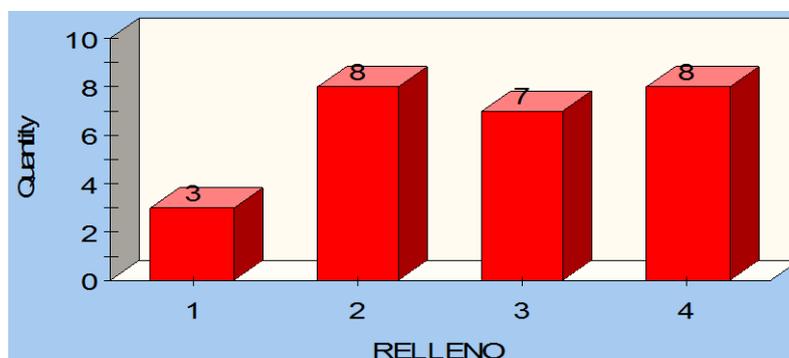
**Figura 5.3.** Histograma de rugosidad de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.4.** Histograma de apertura de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.5.** Histograma de relleno de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.6.** Histograma de meteorización de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.

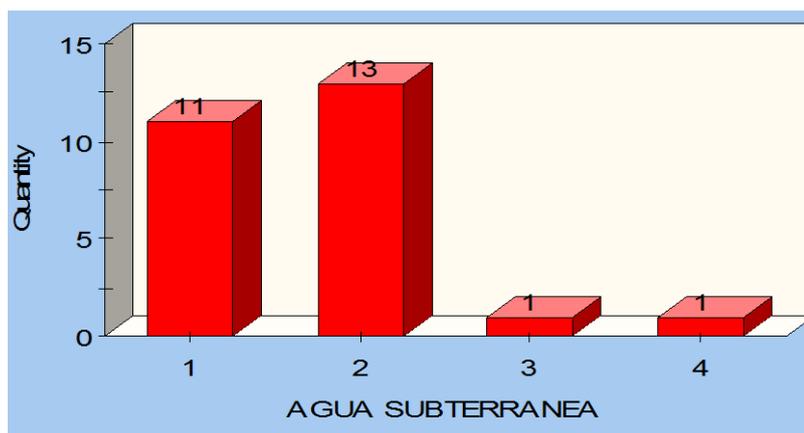


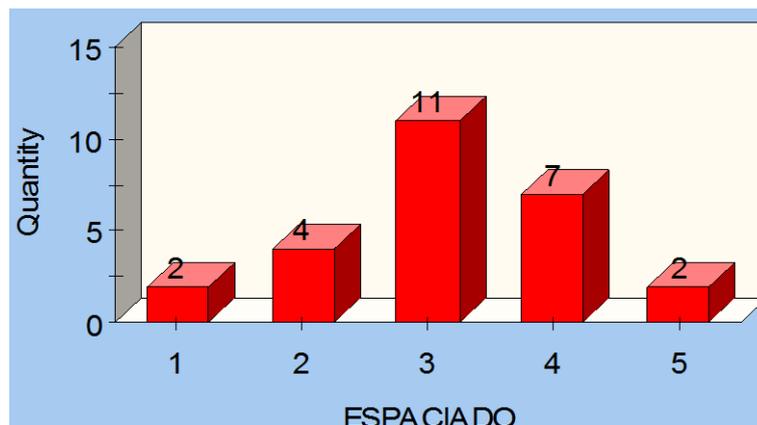
Figura 5.7. Histograma de agua subterránea de familia 1.

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.7. Sinopsis de registro lineal de familia 2 Tajo Apumayo Sur.

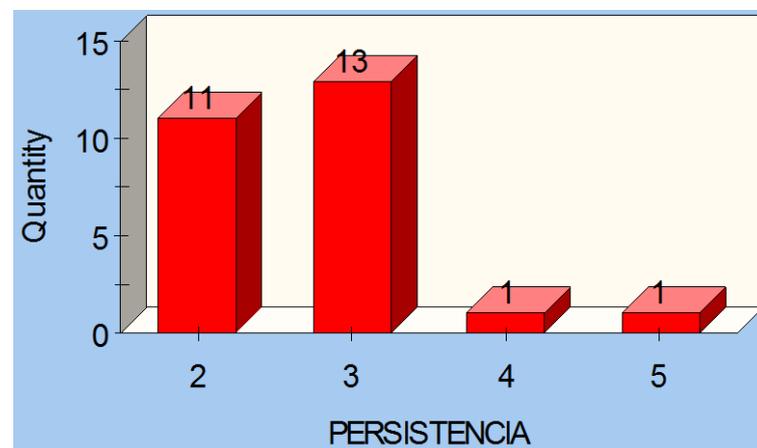
Sinopsis de registro lineal de familia 2- Tajo Apumayo Sur..										
N°	DIP (Buzamiento)	DIP DIR (Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
1	86	206	2	2	2	2	2	4	2	1
2	87	209	2	4	2	4	3	1	3	1
3	86	212	2	4	2	2	4	3	4	2
4	81	214	2	2	3	4	2	4	1	1
5	79	207	2	3	3	2	2	2	2	1
6	72	199	2	4	3	3	2	1	4	1
7	69	192	2	4	3	2	3	2	2	1
8	65	189	2	2	2	3	3	2	4	1
9	56	189	2	1	3	3	2	3	3	5
10	59	194	2	3	5	3	3	3	2	1
11	67	186	2	3	3	3	5	3	4	3
12	74	191	2	3	3	3	3	3	4	3
13	76	193	2	3	3	5	4	1	2	1
14	85	193	2	5	4	1	4	3	2	2
15	87	194	2	3	3	3	3	3	4	2
16	80	193	2	3	3	2	4	4	2	1
17	70	194	2	4	2	3	3	3	2	2
18	66	199	2	3	3	3	3	3	4	1
19	72	208	2	4	2	2	2	3	4	1
20	64	196	2	4	2	3	2	4	4	1
21	57	192	2	2	2	2	5	5	4	1
22	53	191	2	1	2	4	2	1	4	1
23	61	195	2	3	2	4	1	1	2	2
24	48	198	2	3	3	4	3	3	3	1
25	52	206	2	3	3	2	4	2	3	1
26	58	207	2	5	2	3	2	2	1	1

Fuente. Autor de tesis.



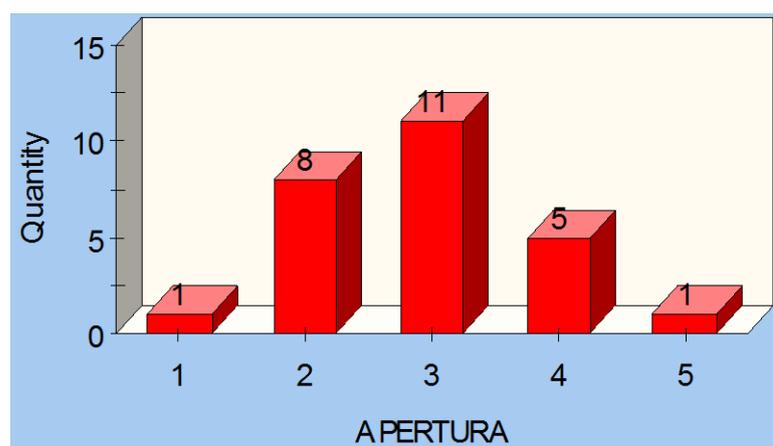
**Figura 5.8.** Histograma de espaciado de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.



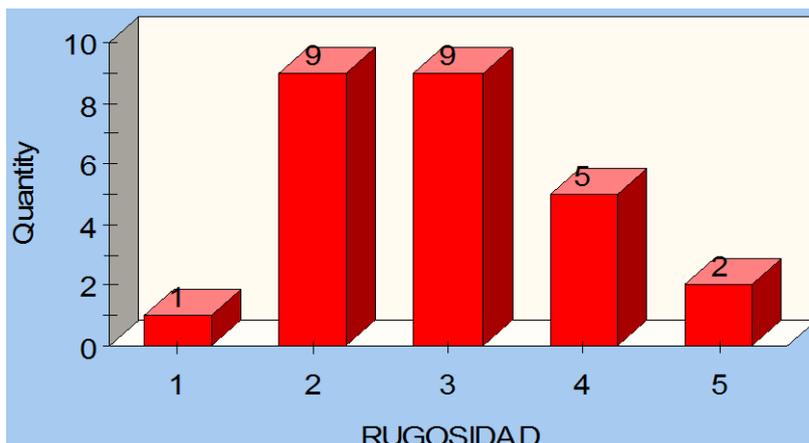
**Figura 5.9.** Histograma de persistencia de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.



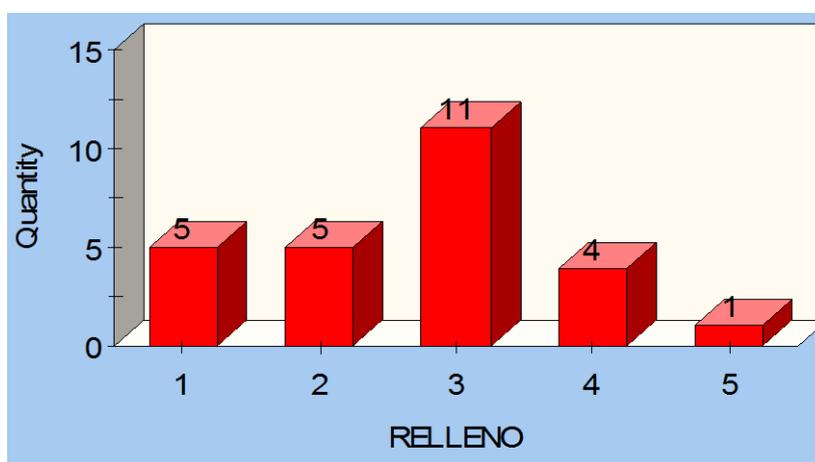
**Figura 5.10.** Histograma de apertura de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.



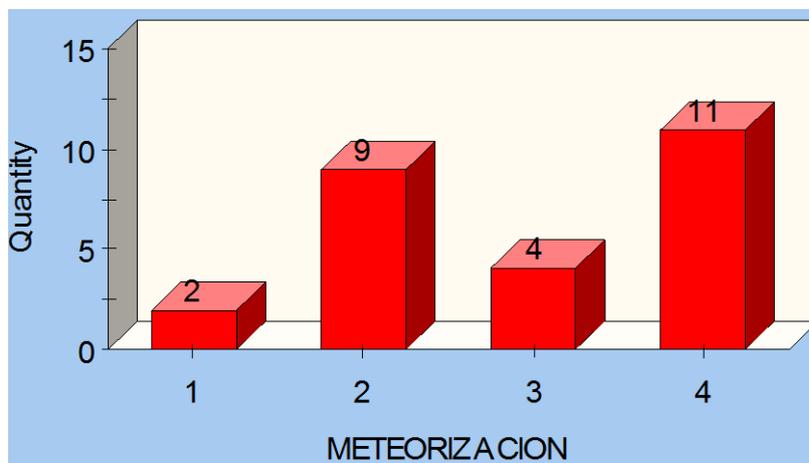
**Figura 5.11.** Histograma de rugosidad de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.12.** Histograma de relleno de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.13.** Histograma de meteorización de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.

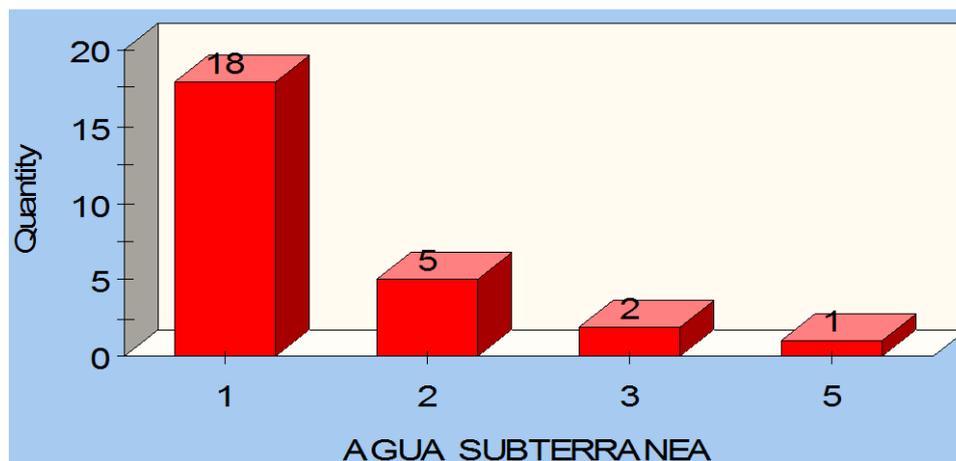


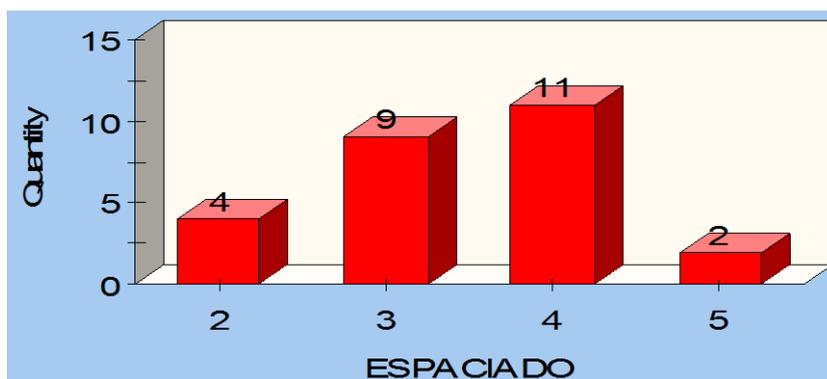
Figura 5.14. Histograma de agua subterránea de familia 2.

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.8. Sinopsis de registro lineal de familia 3 - Tajo Apumayo Sur.

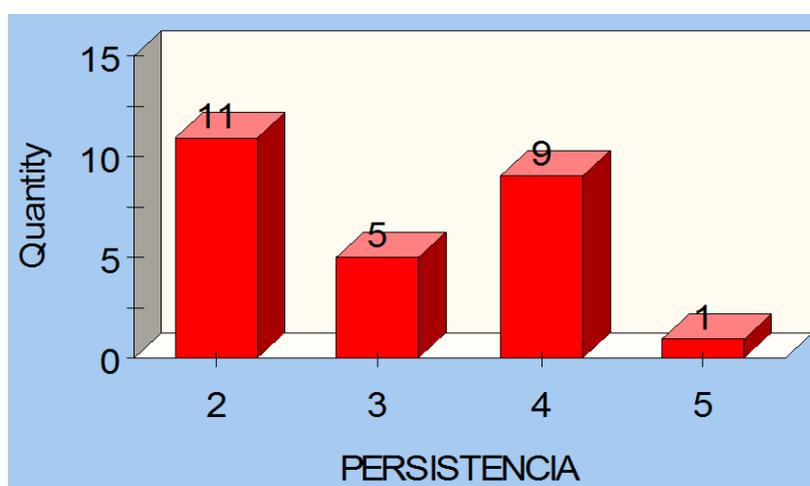
Sinopsis de registro lineal de familia 3- Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	DIP DIR (Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
1	84	256	3	3	3	3	2	3	3	1
2	88	256	3	3	5	3	3	2	3	2
3	87	260	3	5	2	3	5	4	3	2
4	87	265	3	2	2	3	1	5	1	2
5	86	267	3	4	4	3	3	1	1	1
6	82	269	3	3	2	3	3	1	5	2
7	87	270	3	3	2	2	3	3	3	1
8	87	272	3	3	2	4	3	1	3	2
9	86	277	3	2	2	4	3	4	4	4
10	87	280	3	4	4	3	3	2	2	2
11	87	273	3	4	4	4	4	4	5	2
12	82	270	3	4	4	2	4	4	5	4
13	78	267	3	4	4	4	3	2	3	2
14	76	264	3	4	3	2	4	3	1	2
15	73	259	3	4	4	2	3	3	3	1
16	64	251	3	3	2	3	4	4	3	1
17	50	251	3	3	4	2	4	2	1	2
18	40	254	3	3	3	3	3	4	5	2
19	41	268	3	3	2	2	5	4	3	1
20	34	275	3	5	2	4	1	4	4	2
21	44	271	3	4	3	3	5	4	3	2
22	54	278	3	2	3	5	1	2	3	3
23	61	276	3	4	2	3	1	2	1	3
24	65	275	3	2	4	3	4	2	4	2
25	69	281	3	4	4	2	4	1	4	2
26	71	272	3	4	2	2	3	3	2	2

Fuente. Autor de tesis.



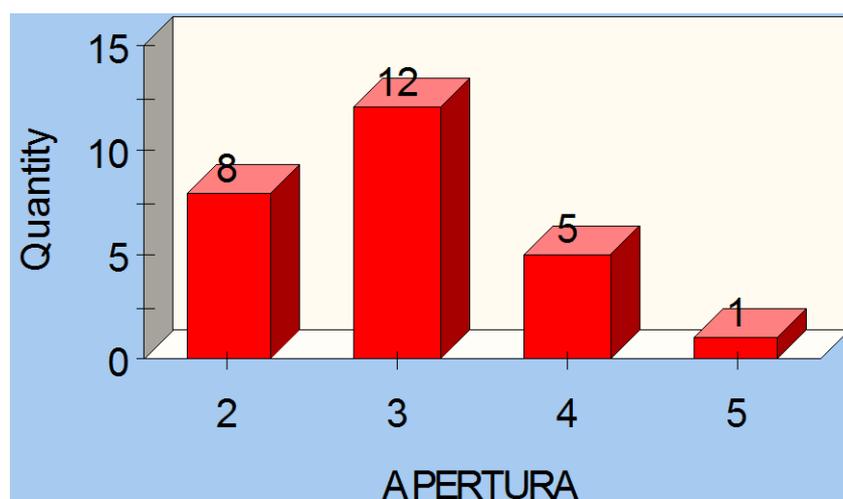
**Figura 5.15.** Histograma de espaciado de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.



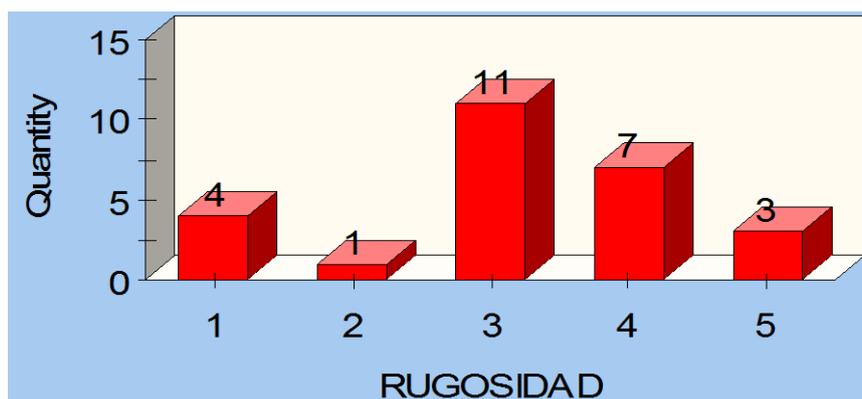
**Figura 5.16.** Histograma de persistencia de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.



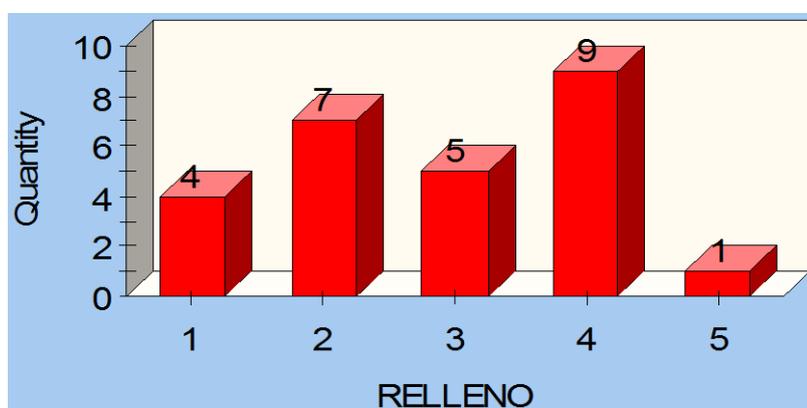
**Figura 5.17.** Histograma de apertura de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.



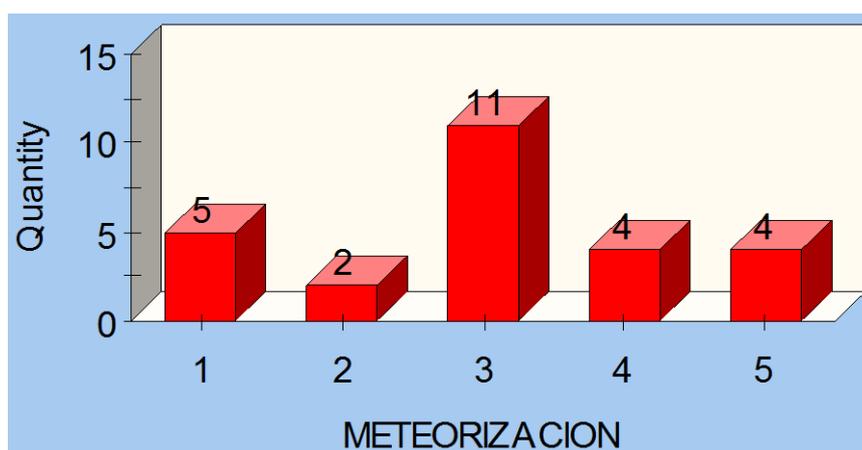
**Figura 5.18.** Histograma de rugosidad de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.19.** Histograma de relleno de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.20.** Histograma de meteorización de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.

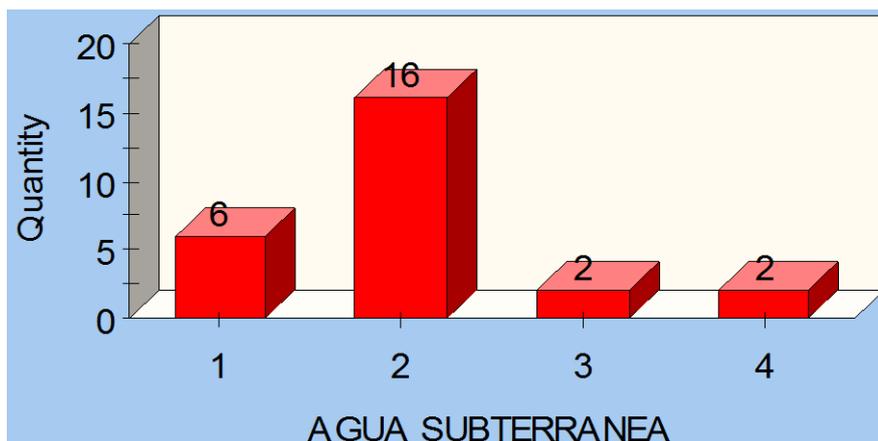


Figura 5.21. Histograma de agua subterránea de familia 3.

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.9. Sinopsis de registro lineal de familia 4 - Tajo Apumayo Sur.

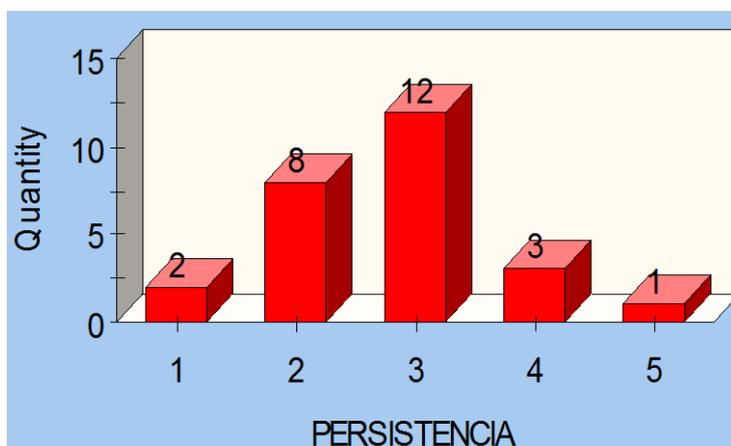
Sinopsis de registro lineal de familia 4 - Tajo Apumayo Sur.										
N°	DIP (Buzamiento)	DIP DIR (Dirección de buzamiento)	Set (Familia)	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Meteorización	Agua subterránea
1	61	23	4	2	4	4	2	2	2	1
2	60	35	4	4	4	2	4	1	4	1
3	63	39	4	4	3	4	4	4	2	3
4	70	038	4	3	1	4	1	4	2	1
5	69	035	4	3	2	4	4	1	2	2
6	74	37	4	4	3	4	4	2	4	1
7	68	36	4	3	3	3	3	4	4	1
8	69	29	4	4	2	3	4	1	3	3
9	65	20	4	1	3	4	4	5	3	3
10	58	19	4	3	3	3	3	1	2	3
11	51	15	4	5	3	5	3	3	4	1
12	56	18	4	3	3	3	4	3	4	3
13	46	26	4	3	2	3	3	2	4	3
14	66	30	4	3	2	3	4	3	2	2
15	59	27	4	3	5	2	4	3	2	2
16	67	26	4	3	1	4	3	5	4	2
17	71	24	4	3	3	3	5	3	2	1
18	71	20	4	4	2	3	2	3	4	1
19	72	14	4	2	4	1	4	4	4	3
20	75	5	4	4	2	2	1	4	4	1
21	83	5	4	3	3	2	4	3	4	2
22	82	10	4	3	2	4	2	3	3	2
23	69	13	4	3	2	2	1	3	2	2
24	66	12	4	3	3	2	5	2	3	3
25	48	14	4	3	3	3	4	1	3	3
26	44	22	4	3	3	3	2	4	2	1

Fuente. Autor de tesis.



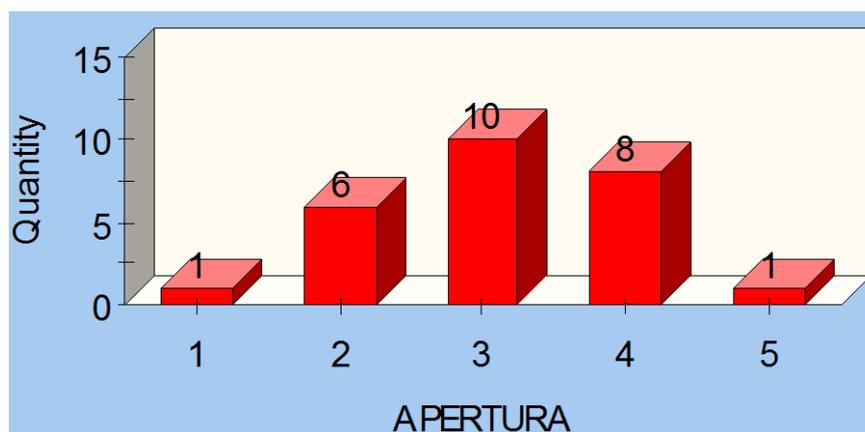
**Figura 5.22.** Histograma de espaciado de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



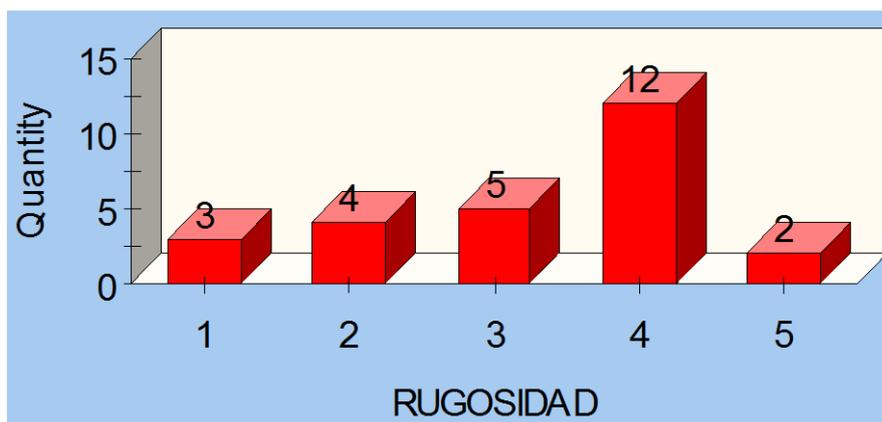
**Figura 5.23.** Histograma de persistencia de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



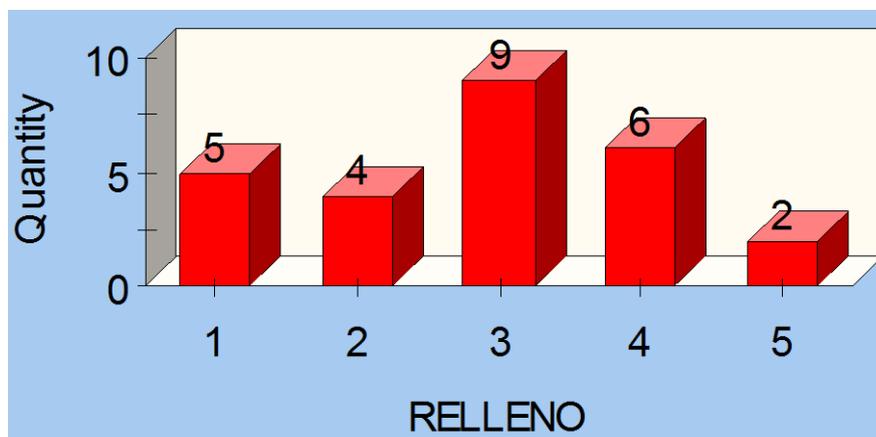
**Figura 5.24.** Histograma de apertura de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



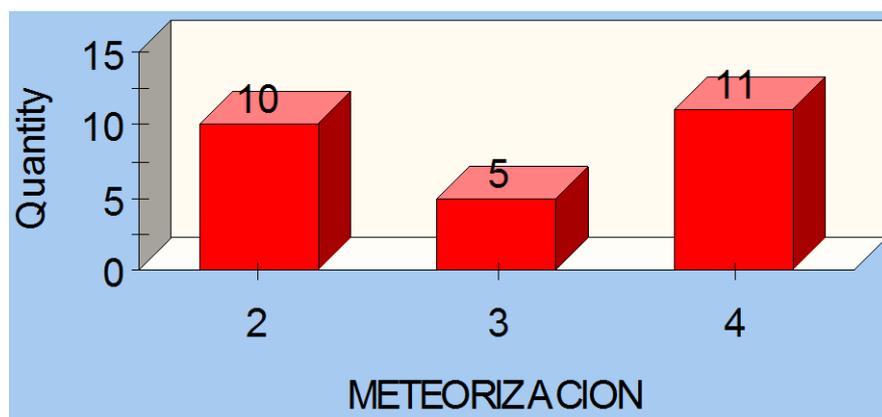
**Figura 5.25.** Histograma de rugosidad de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



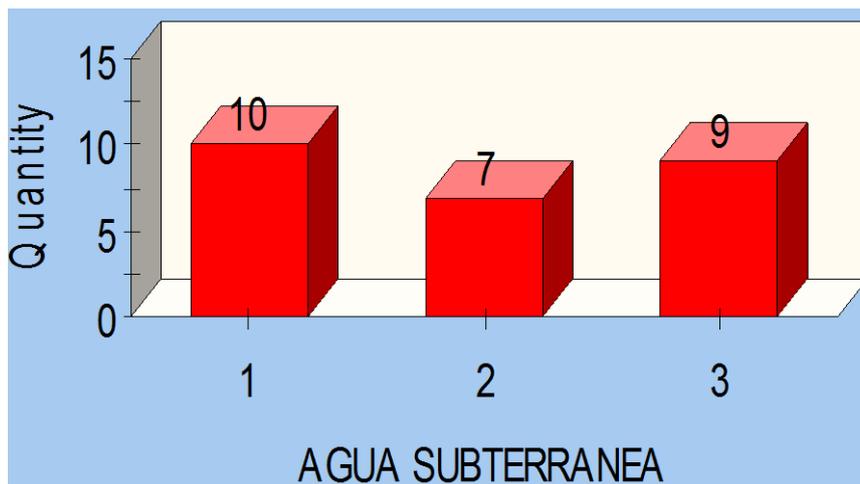
**Figura 5.26.** Histograma de relleno de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



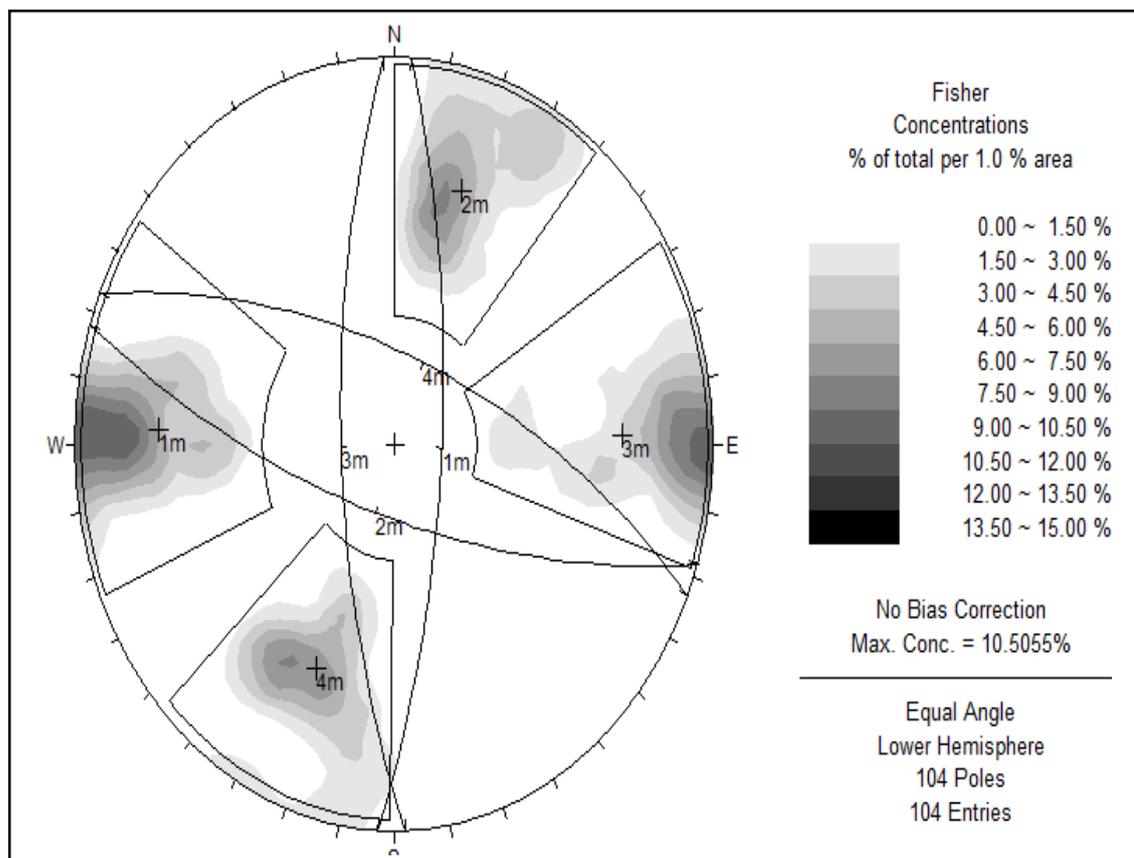
**Figura 5.27.** Histograma de meteorización de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



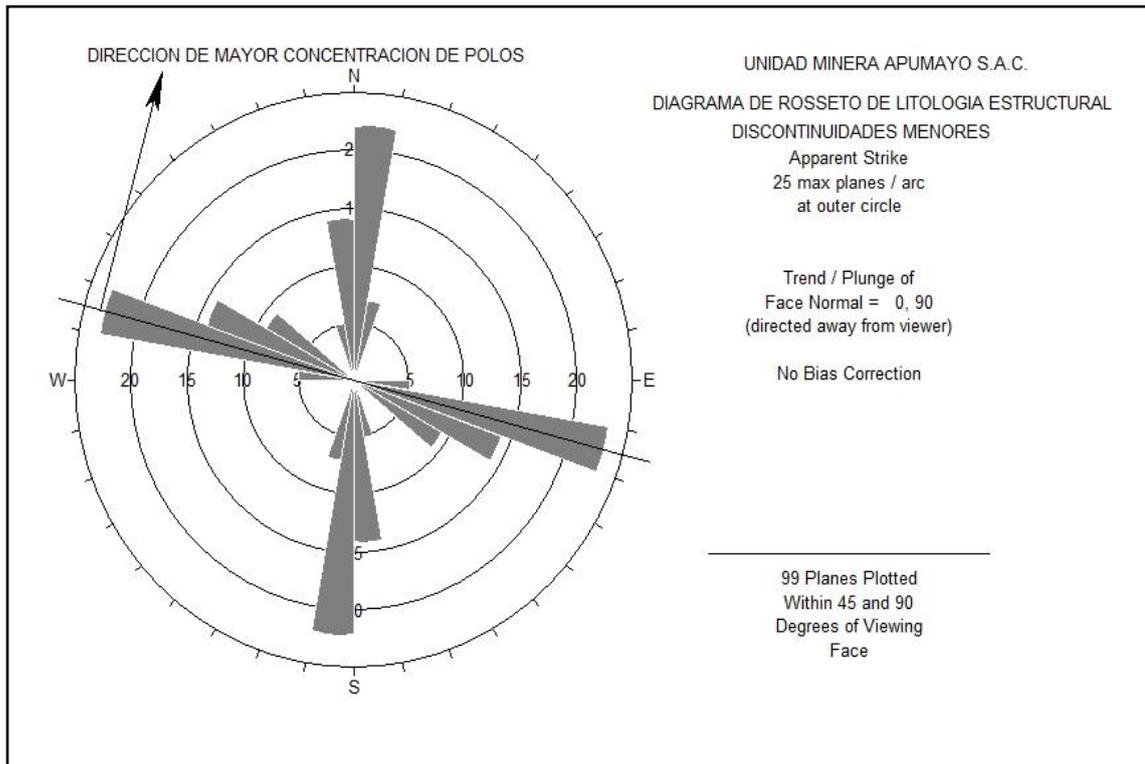
**Figura 5.28.** Histograma de agua subterránea de familia 4.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.29.** Densidad de polos.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.30.** Diagrama de rosseto de U.M. Apumayo SAC.

Fuente. Autor de tesis.

**5.2.3 Determinación de RQD (Rock Quality Designation)**

*Priest and Hudson* (1976), sugirió la estimación del índice RQD a partir de la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$ , que proporciona el valor teórico de RQD.

$$RQD=100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda+1)$$

Donde:

$\lambda$ =Número de discontinuidades por metro lineal.

Longitud total=23 m.

Número de diaclasas= 104 diaclasas

$$\lambda=104/23=4.52$$

$$RQD=100e^{-0.1*4.52} (0.1*4.52+1)$$

$$RQD=100e^{-0.452} (0.452+1)$$

$$RQD=100(0.636354)(1.452)$$

$$RQD= 92.3\%$$

### 5.2.4 Resistencia compresiva uniaxial (RCU)

Ver Tabla 5.10.

**Tabla 5.10.** Resistencia compresiva de las rocas alteradas de Tajo Apumayo Sur.

Alteración	Símbolo	Peso unitario saturado (Kg/m <sup>3</sup> )	RCU(MPa)
Sílice Alunita	(SA)	21.2	22
Clay	(C)	21	22
Propilítico	(PRO)	23	24
Sílice Granular	(SG)	23.2	23.2
Sílice Masiva	(SM)	23.2	23.2
Promedio			22.8≈23

Fuente. Área de geomecánica de U.M. Apumayo SAC.

### 5.2.5 Evaluación geomecánica de tajo Apumayo Sur progresiva 00-23 m

Ver Tabla 5.11.

**Tabla 5.11.** Resumen de valor representativo de discontinuidades del registro lineal.

Nombre	Características de familias - progresiva 00 - 23.00 m				Resultados
	Familia N° 1	Familia N° 2	Familia N° 3	Familia N° 4	
Espaciado	200-600 mm	200-600 mm	60-200 mm	200-600	200-600 mm
Persistencia	1-3m	3-10 m	1-3 m	3-10m	1-3 m
Apertura	Angosto 0.1-1.0	Angosto 0.1-	Angosto 0.1-	Angosto 0.1-	Angosto 0.1-1.0
Rugosidad	Mediana rugosa	Mediana rugosa	Mediana rugosa	Livian rugosa	Mediana Rugosa
Relleno	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Suave <5 mm	Duro >5 mm	Duro > 5mm
Meteorización	Moderada	Muy meteor	Moderada	Muy meteor	Moderada
Agua subterránea	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Seco

Fuente: Autor de tesis.

### 5.2.6 Determinación de RMR básico de tajo Apumayo Sur

Ver Tabla 5.12.

**Tabla 5.12.** Determinación de RMR básico.

Tajo Apumayo Sur progresiva 00-23.00 m		
Parámetro	Resultados cuantitativos	Valoración
Resistencia compresiva uniaxial (Mpa)	23 MPa	2
RQD	92%	20
Espaciado	200- 600 mm	8
Persistencia	1-3m	4
Apertura	Ang. 0.1-1.00 mm	3
Rugosidad	Mediana rugosa	3
Relleno	Duro>5mm	2
Meteorización	Moderada	3
Agua subterránea	Humedo	7
<b>RMR básico</b>		<b>52</b>

Fuente. Autor de tesis.

RMR básico : 52

El macizo rocoso es andesita silisificada (sílice masiva, granular y alunita). Valor de

RMR 52 en la tabla de Bieniawski 1989 se tiene:

**Tipo de roca** : Andesita silisificada (alterada).

**Categoría** : III.

**Calidad** : Regular – media.

### 5.2.7 Perforación y voladura

**Plan de voladura.** Este plan está basado en el tamaño de fragmentado que deseamos tener, y la primera condición es la chancadora, acepta un fragmento de 60 cm como tamaño máximo, la segunda restricción que tenemos es la dureza de la roca, la cual nos obliga a utilizar explosivos de alta velocidad de detonación, o cual eleva el costo de explosivos, sin embargo en el contexto general si obtenemos una buena fragmentación el gasto elevado en explosivos se ve recuperado en el menor trabajo de la chancadora, la cual, requiere de menor energía para triturar los fragmentos, también con una buena

fragmentación se obtiene mejores resultados en *pad* de lixiviación. Otra condición son la temporadas de lluvias, que obliga a utilizar ANFO pesado con mayor proporción de emulsión para que el explosivo sea resistente al agua, mínimo 72 horas en el taladro.

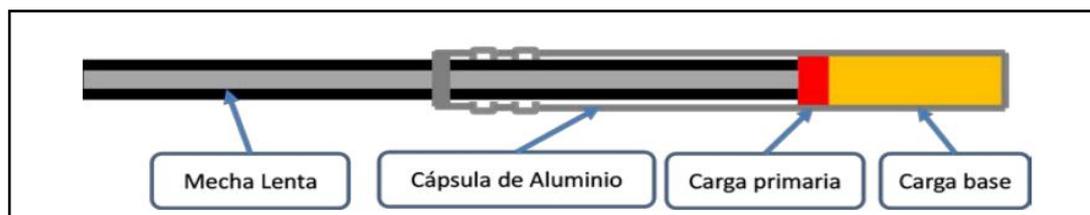
### **5.2.8 Sistemas de iniciación en voladura**

Los diferentes sistemas de iniciación, conocidos como detonadores, pueden emplearse tanto en voladuras a cielo abierto como en interior y la finalidad es la de iniciar los explosivos dentro del barreno, o bien el cartucho cebo o multiplicador que desencadene la detonación en el interior del mismo. Como se verá más adelante, algunos tipos de detonadores tienen un uso mucho más restringido y en aplicaciones específicas, como es el caso de los detonadores ordinarios. La elección de cada uno de los tipos de detonadores vendrá determinada por las necesidades de secuenciación, características del entorno y facilidad en la realización de la conexión, entre otros factores. Todos los detonadores de uso civil empleados habitualmente tienen en común que contienen aproximadamente la misma carga explosiva, siendo el elemento diferenciador el modo de iniciación de la carga. En términos generales, constan de una cápsula metálica de aluminio, o cobre, donde se aloja un explosivo iniciador, formando la llamada carga base (compuesta por trinitrorresorcinato de plomo y azida de plomo), y una carga base (compuesta por pentrita). Esta carga explosiva se inicia por medio de una píldora inflamable (en detonadores eléctricos, no eléctricos o electrónicos) o bien directamente por efecto de una llama (detonadores ordinarios).

### **5.2.9 Detonadores ordinarios**

Son aquellos que se inician mediante mecha lenta. La mecha lenta se introduce en el extremo abierto de una cápsula de aluminio que aloja la carga explosiva del detonador y se engarza mediante unas tenazas especiales, de modo que se evite que la mecha se

salga durante su manipulación. Se usa, por tanto, únicamente en voladuras de roca ornamental. Debido a su configuración, no es posible establecer ningún tipo de retardo en el detonador, por lo que una vez que llegue la llama propagada por la pólvora que lleva alojada la mecha en su interior, el detonador se inicia instantáneamente. Ver Figura 5.31.



**Figura 5.31.** Detonador ordinario.

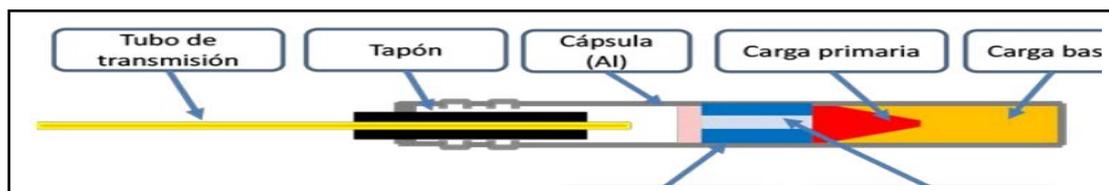
Fuente. Minería General-Universidad de Chile.

#### 5.2.10 Iniciación no electrónica

**Detonadores no eléctricos.** Los detonadores no eléctricos se caracterizan porque no interviene ningún tipo de corriente eléctrica en su iniciación. La parte explosiva es común a los detonadores eléctricos, pero en lugar de un inflamador pirotécnico la carga portarretardo se inicia por medio de una onda de choque de baja energía que se transmite a través de un tubo de transmisión.

**Detonador no eléctrico con retardo.** Su función es prácticamente igual al eléctrico, pero se activa por medio de una manguera o tubo delgado flexible que transmite una onda de choque deflagrante desde una línea troncal de cordón detonante. El conjunto comprende al detonador, el tubo flexible transmisor y un conector plástico “J” para empalmar el cordón.

También son instantáneos y de retardo (período corto en milisegundos y período largo en medios segundos) con potencias N° 10 y N° 12. Ver Figura 5.32.



**Figura 5.32.** Detonador no eléctrico.

Fuente. Minería General-Universidad de Chile.

### 5.2.11 Porcentil P80 en 2014 tajo Apumayo Sur malla 3.00x3.00m en buffer y producción

**RMR 52** : Resultado de la investigación

**Tipo de roca** : Andesita silisificada (alterada)

**Categoría** : III

**Calidad** : Regular – media

### 5.2.12 Calidad del macizo rocoso de acuerdo a rmr 1989 en apumayo sur

Proporcionado por el área de geomecánica-geotécnica. Ver Tabla 5.13.

**Tabla 5.13.** Características de macizo rocoso de andesita alterada en tajo Apumayo Sur.

<b>Características de macizo rocoso de andesita alterada en tajo Apumayo Sur - Área geomecánica</b>				
<b>Alteración</b>	<b>Densidad</b>	<b>RMR</b>	<b>RQD</b>	<b>CALIDAD</b>
Sílice granular	2.31	65	62	Buena
Sílice masiva	2.50	70	65	Buena
Sílice alunita	2.05	58	53	Media
Propilítico	2.70	72	70	Buena
Clay pirita	2.10	53	40	mala

Fuente. Área de Geomecánica-geotécnica de Apumayo Sur.

5.2.13 Iniciación simple no electrónica

Ver Tabla 5.14 y Figura 5.33 y 5.34.

**Tabla 5.14.** Fragmentación con iniciación simple en sílice granular, masiva y alunita, 2014.

Fragmentación con iniciación simple en Sílice granular sílice masiva y sílice alunita en 2014			
P 80	mm	cm	Pulgadas
PRUEBA 1	199.24	19.924	7.844094488
PRUEBA 2	198.25	19.825	7.80511811
PRUEBA 3	210.22	21.022	8.276377953
PRUEBA 4	204.54	20.454	8.052755906
PRUEBA 5	200.21	20.021	7.882283465
PRUEBA 6	198.12	19.812	7.8
PRUEBA 7	196.36	19.636	7.730708661
PRUEBA 8	206.21	20.621	8.118503937
Promedio	201.9871429	20.164375	7.938730315

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.33.** Fragmentación con iniciación simple en sílice granular, masiva y alunita.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.34.** Fragmentación media con iniciación simple en 2014.

Fuente. Autor de tesis.

### **5.2.14 Escenario 1: Fragmentación con iniciación no electrónica y carga explosiva en voladura de producción, antes de optimización banco 4112- Proyecto 05**

Se refiere al tamaño de fragmentación con Wip frag 2010 en proceso productivo banco 4112 Proyecto 05 antes de la optimización en la zona según la Figura 5.34a.

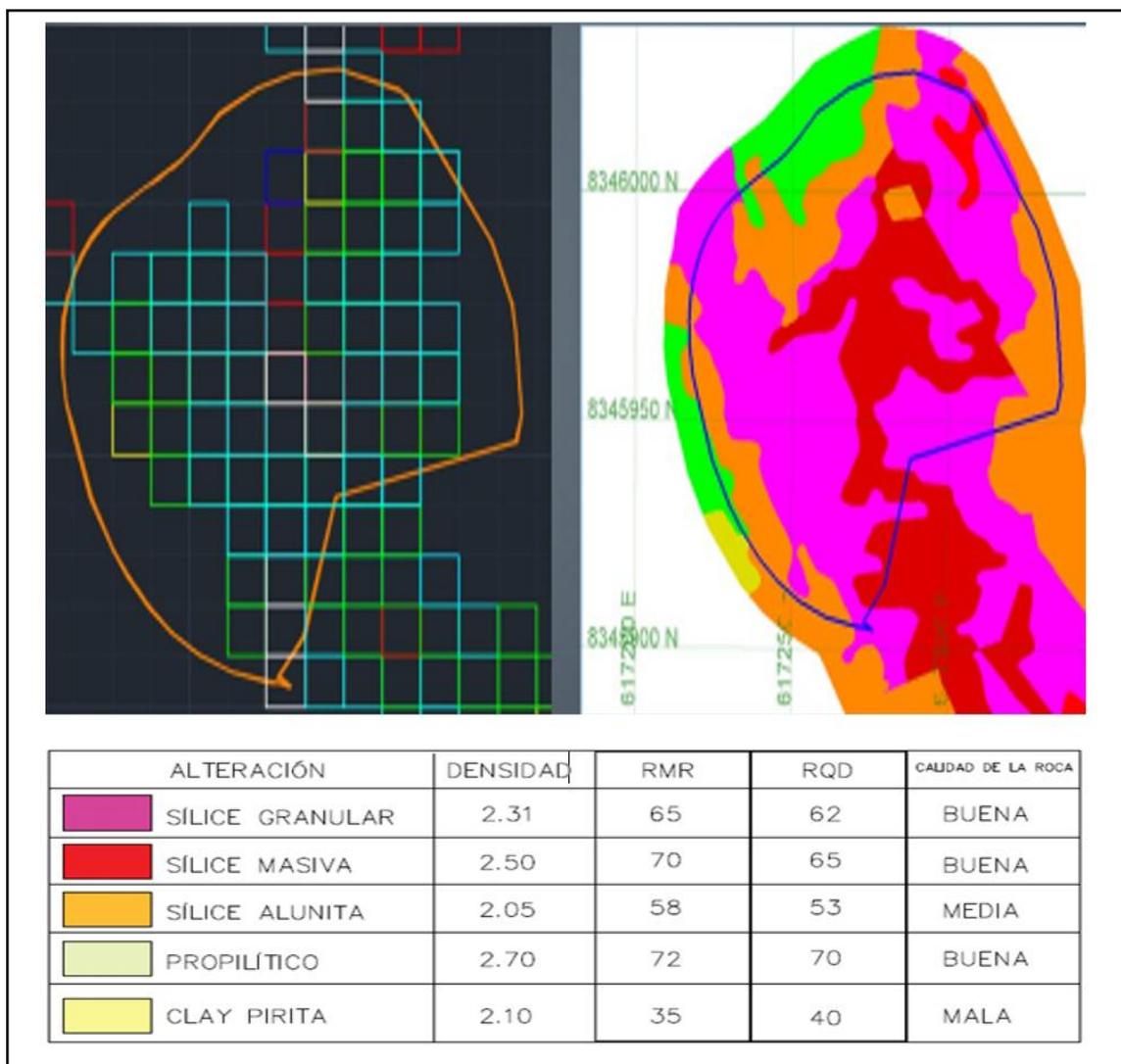


**Figura 5.34a.** Proyecto de voladura para determinar la fragmentación bajo Apumayo banco 4112 PY 05.

Fuente. Área de geomecánica y geotécnica de Apumayo Sur.

### **5.2.15 Planeamiento y geología proyecto con modelo de bloques y alteración**

El zoneamiento geomecánico ha sido proporcionado por Apumayo SAC. El RMR ha sido determinado con la RCU por método no destructivo (esclerómetro) y el RQD mediante la propuesta Palstrom, tal como se observa en Figura 5.35.



**Figura 5.35.** Modelo de bloques y zonificación geomecánica banco 4112-Proyecto 05.

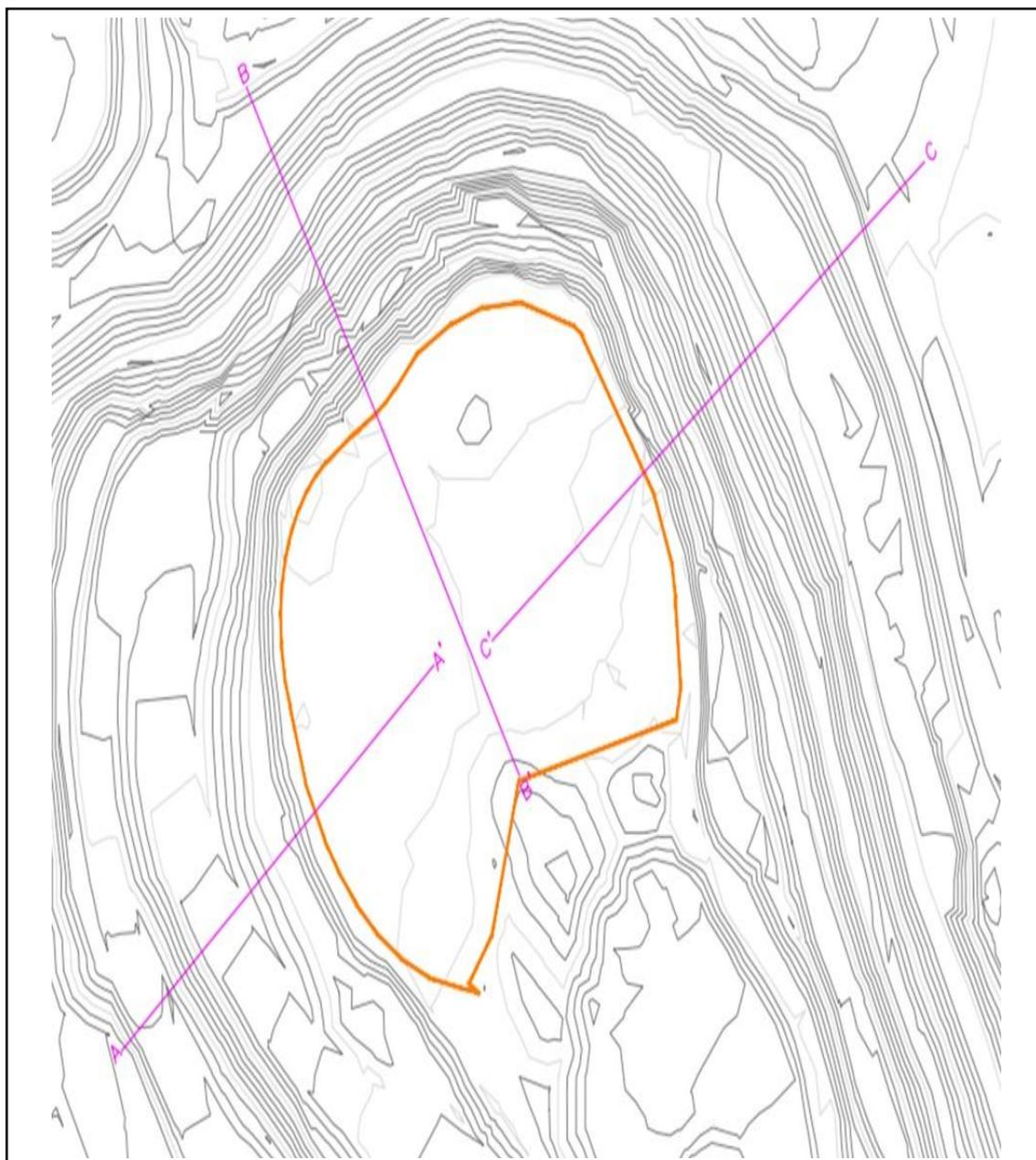
Fuente. Área de geomecánica y geotécnica de Apumayo Sur.

### 5.2.16 Secciones analizadas y factor de seguridad

Se ha trazado tres secciones en la topografía del tajo Apumayo, tal como se observa en

Figura 5.36, estas secciones son:

- A-A'
- B-B'
- C-C'

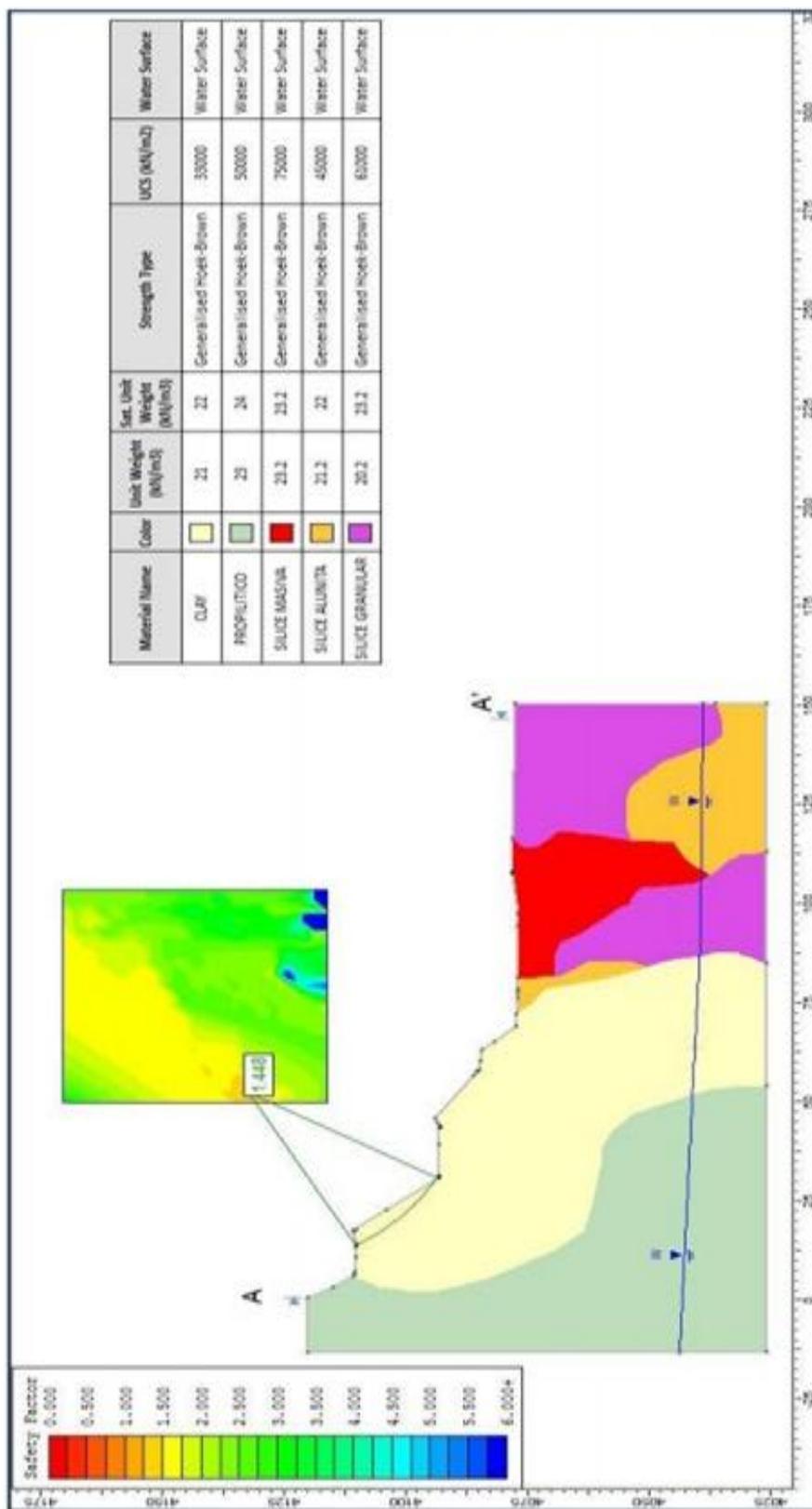


**Figura 5.36.** Secciones en topografía de Tajo Apumayo Sur.

Fuente. Área de topografía de Apumayo Sur.

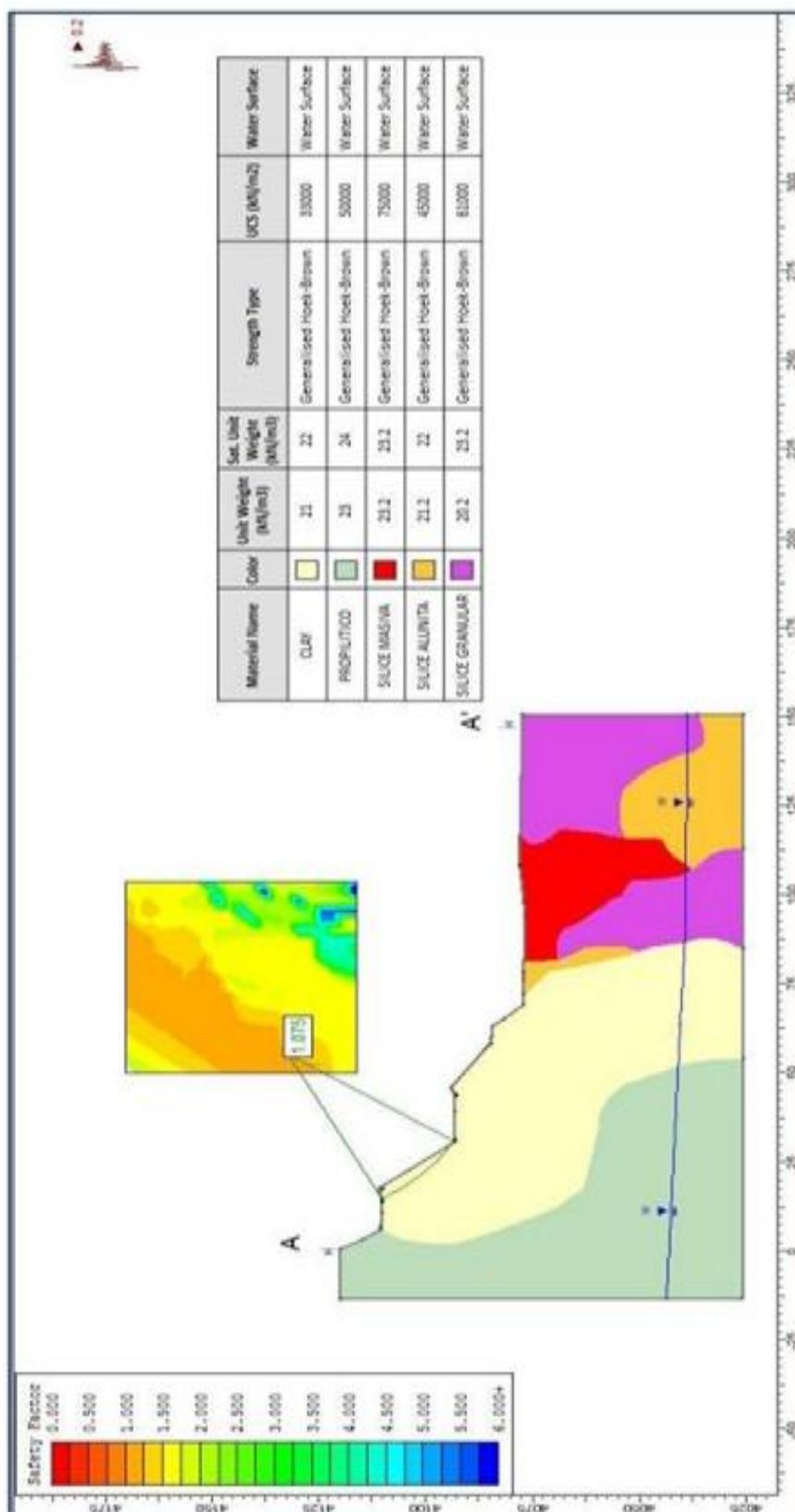
### **5.2.17 Factor de seguridad con software slide de Rocscience antes de la voladura**

Ver Figuras 5.37 hasta 5.42.



**Figura 5.37.** Sección A-A' Factor de seguridad estático 1.448.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



**Figura 5.38.** Sección A-A' Factor de seguridad pseudo estático 1.075

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

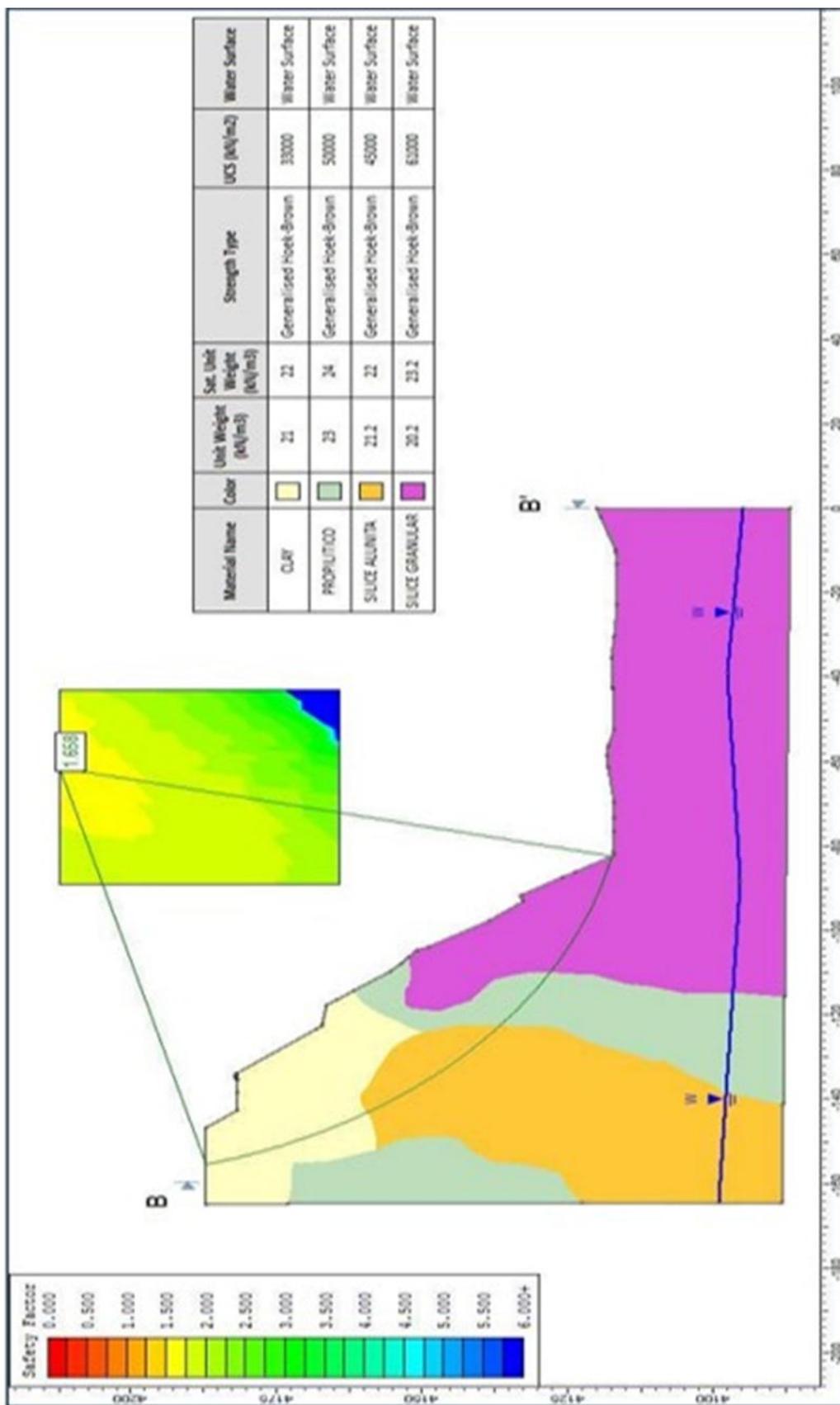
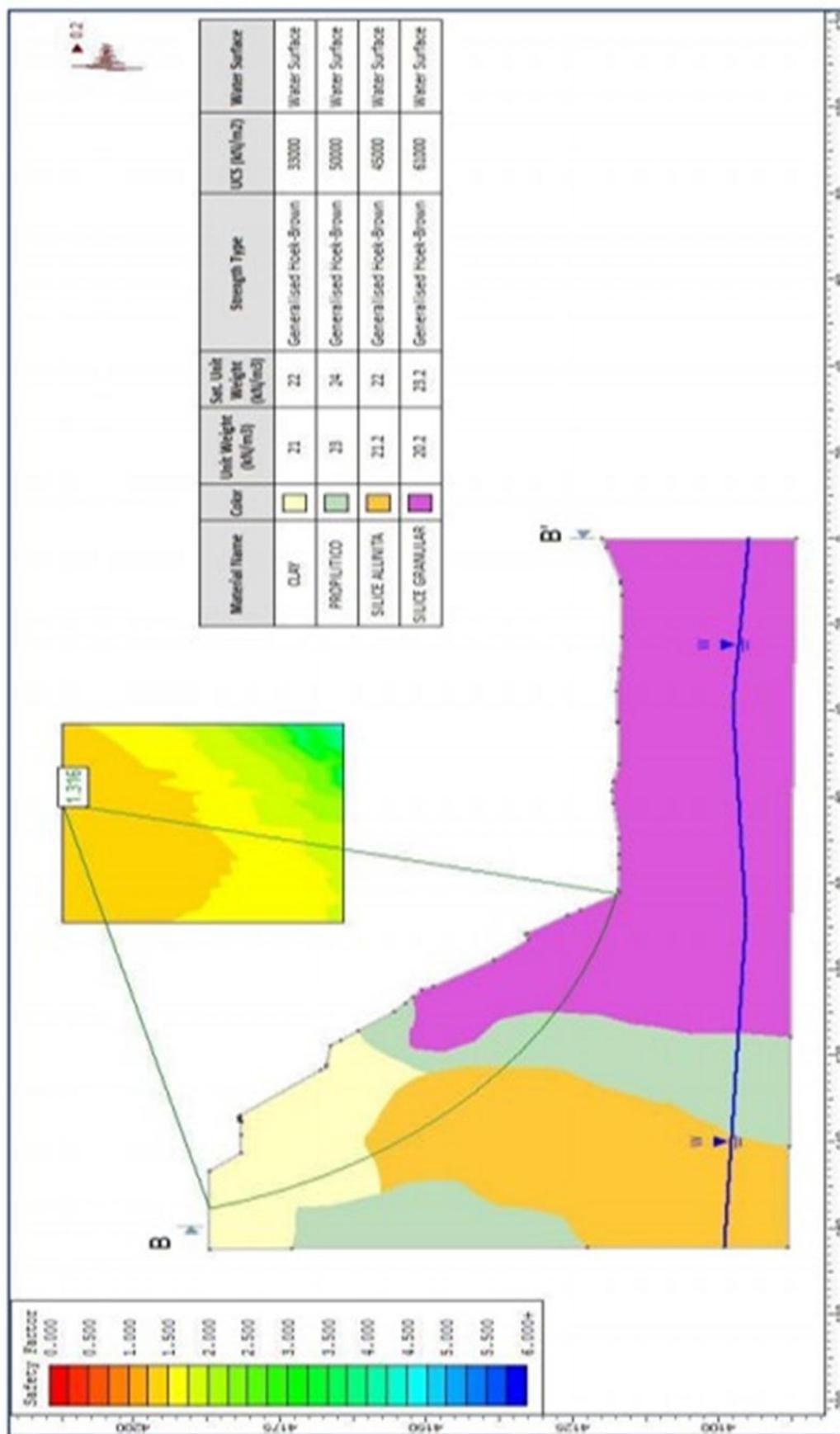


Figura 5.39. Sección B-B' Factor de seguridad estático 1.658.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



**Figura 5.40.** Sección B-B' Factor de seguridad pseudo estático 1.316.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

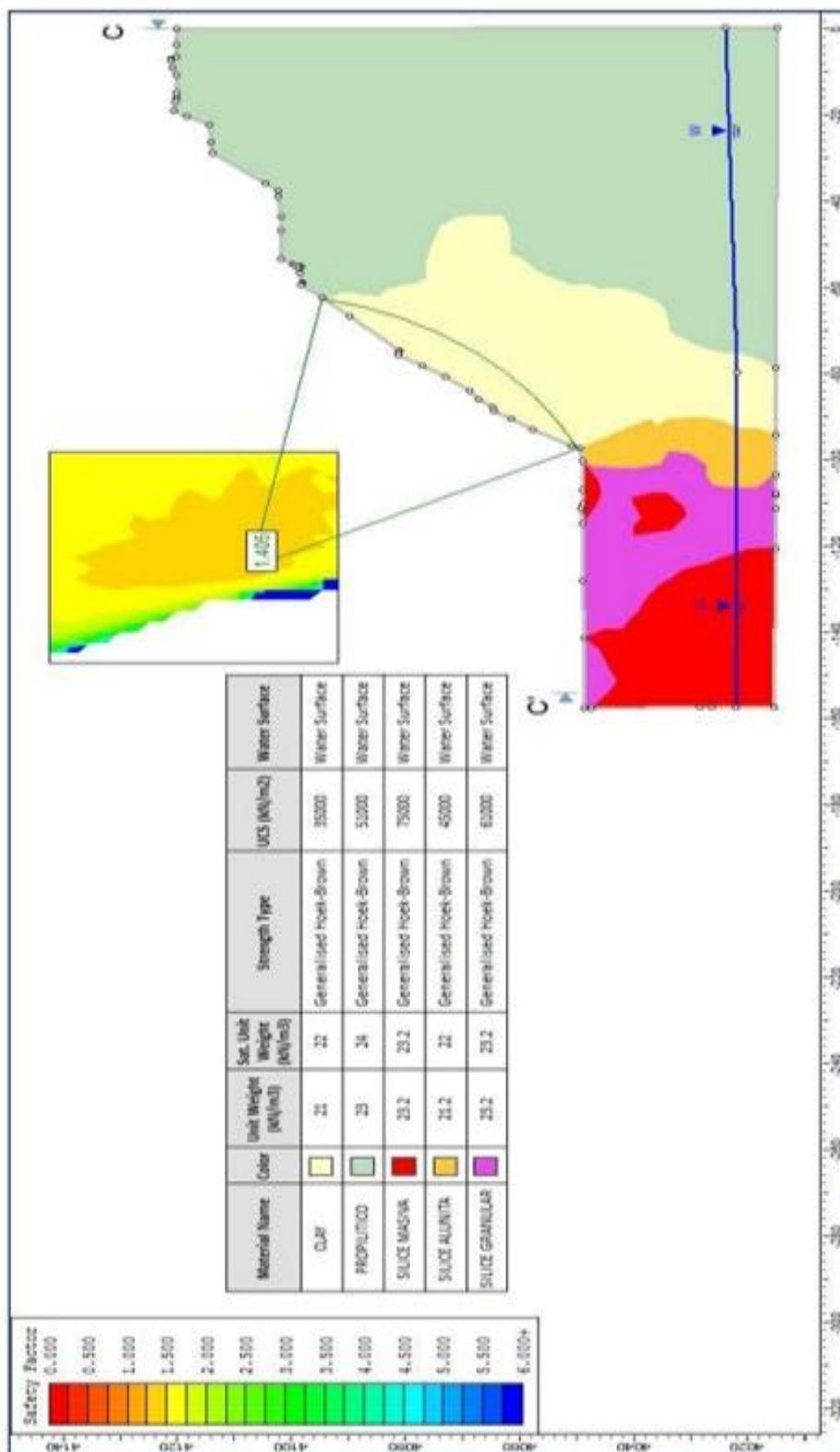


Figura 5.41. Sección C-C' Factor de seguridad estático 1.405.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

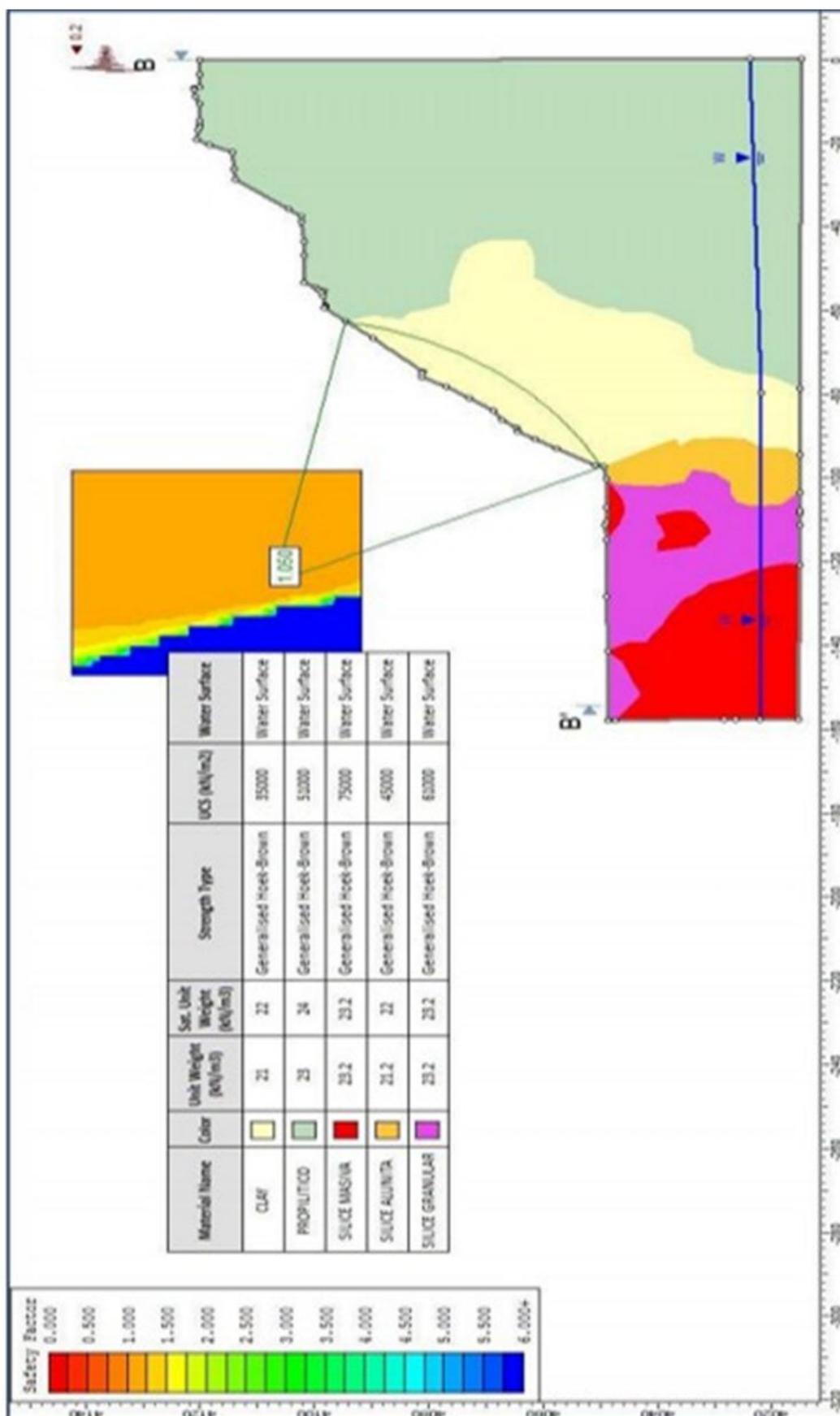


Figura 5.42. Sección C-C' Factor de seguridad pseudo estático 1.050.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

5.2.18 Factor de seguridad después de la voladura

Ver Figuras 5.43 al 5.48.

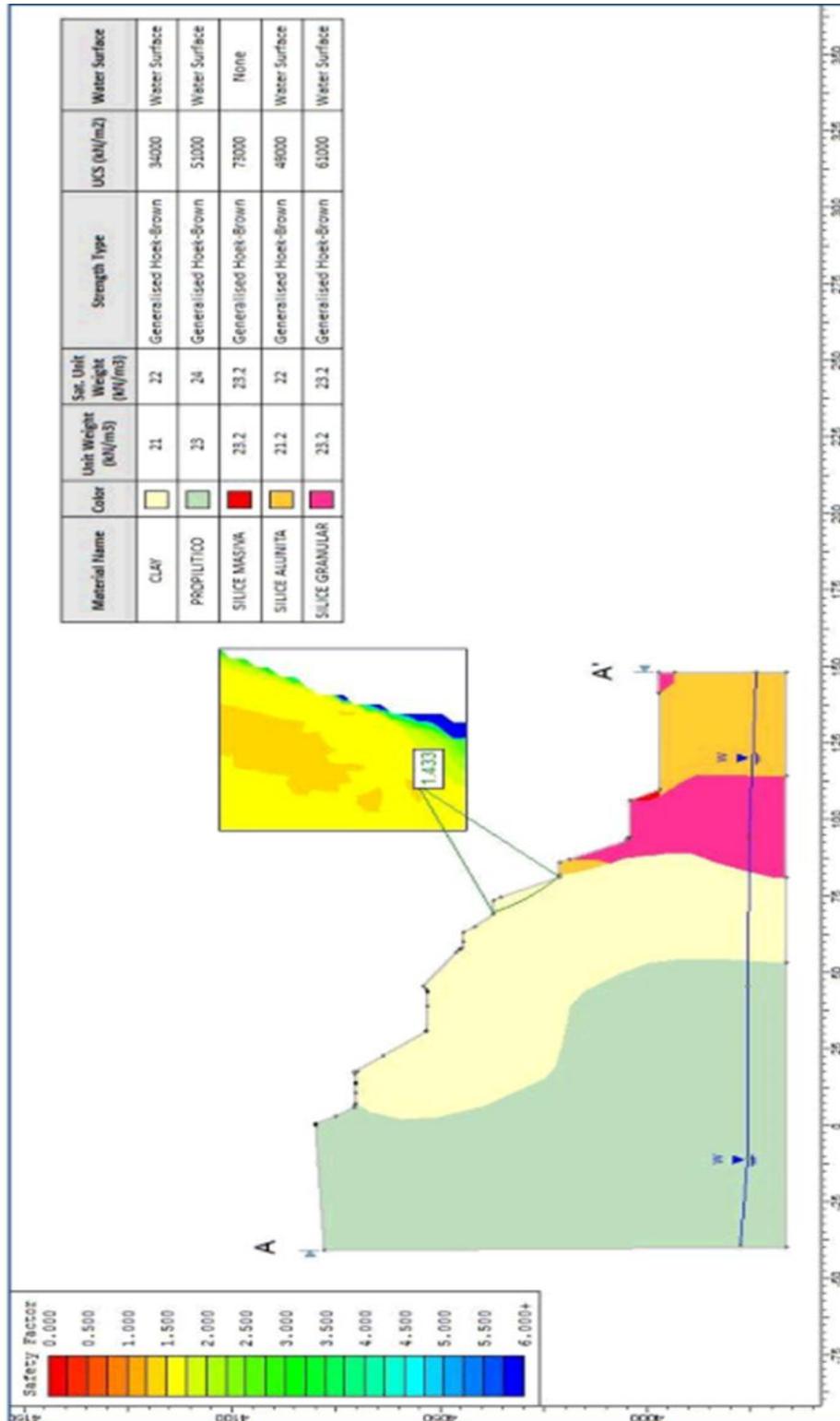
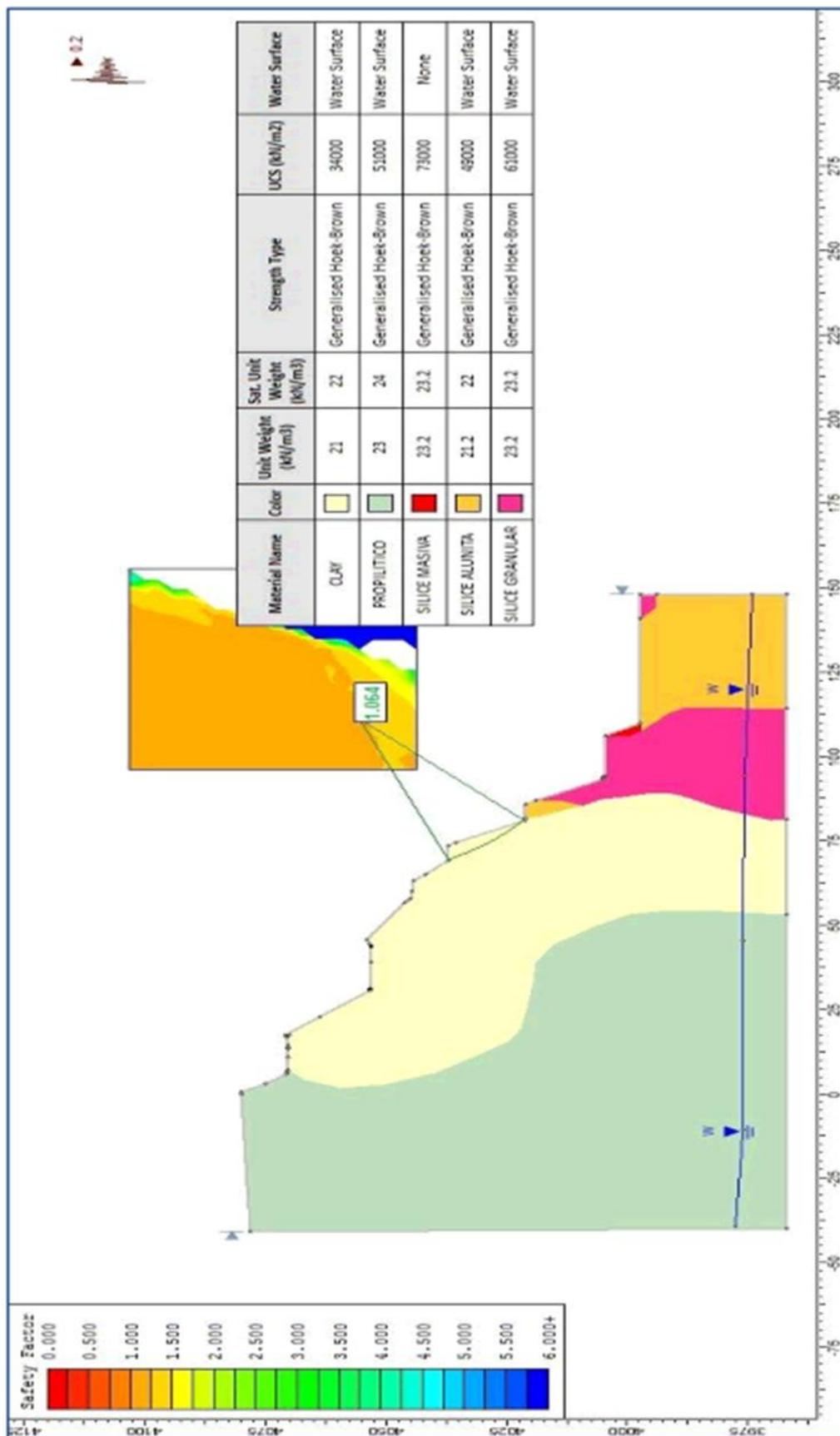


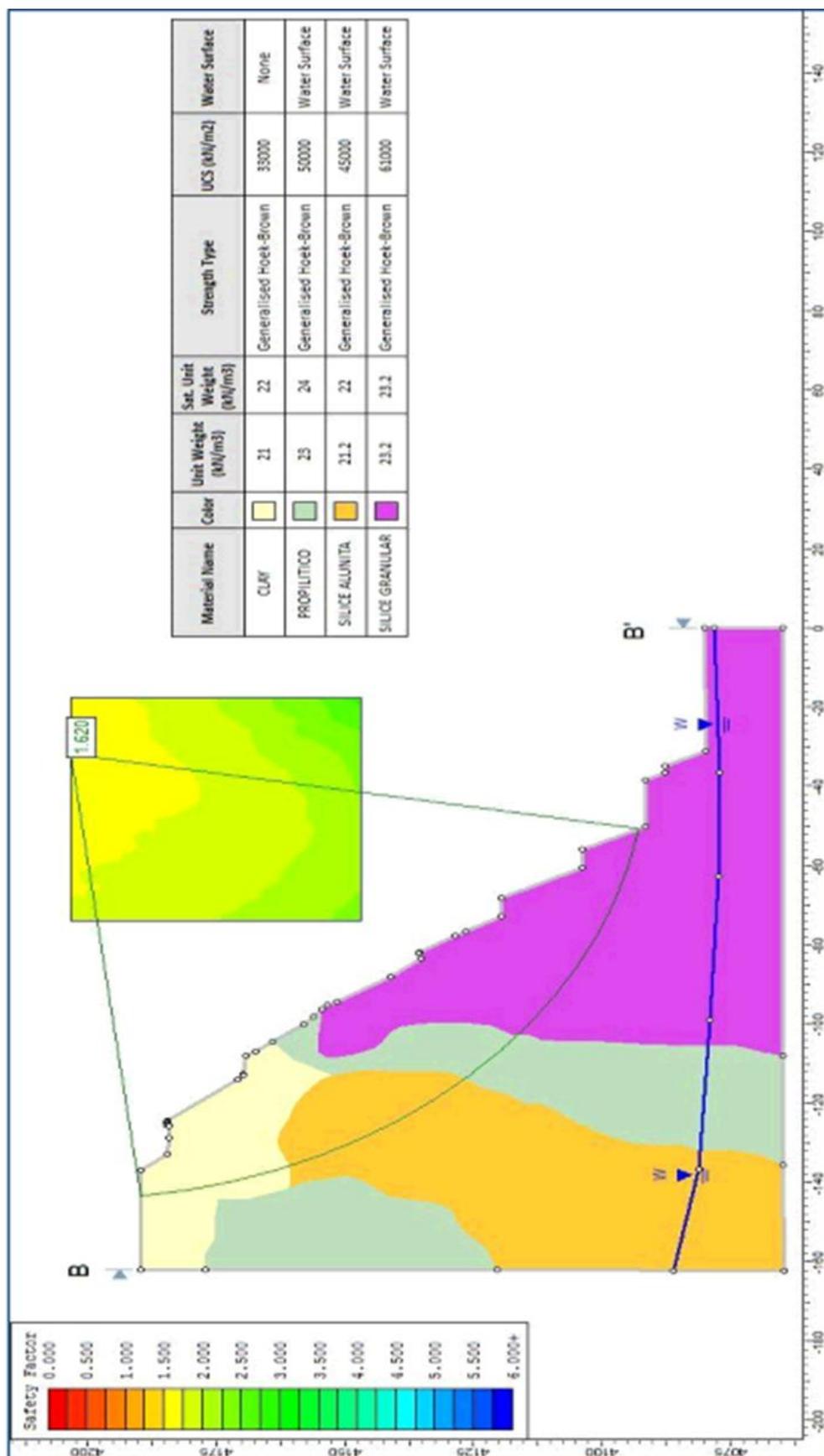
Figura 5.43. Sección A-A' Factor de seguridad estático 1.433.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



**Figura 5.44.** Sección A-A' Factor de seguridad pseudo estático 1.064.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



**Figura 5.45.** Sección B-B' Factor de seguridad estático 1.620.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

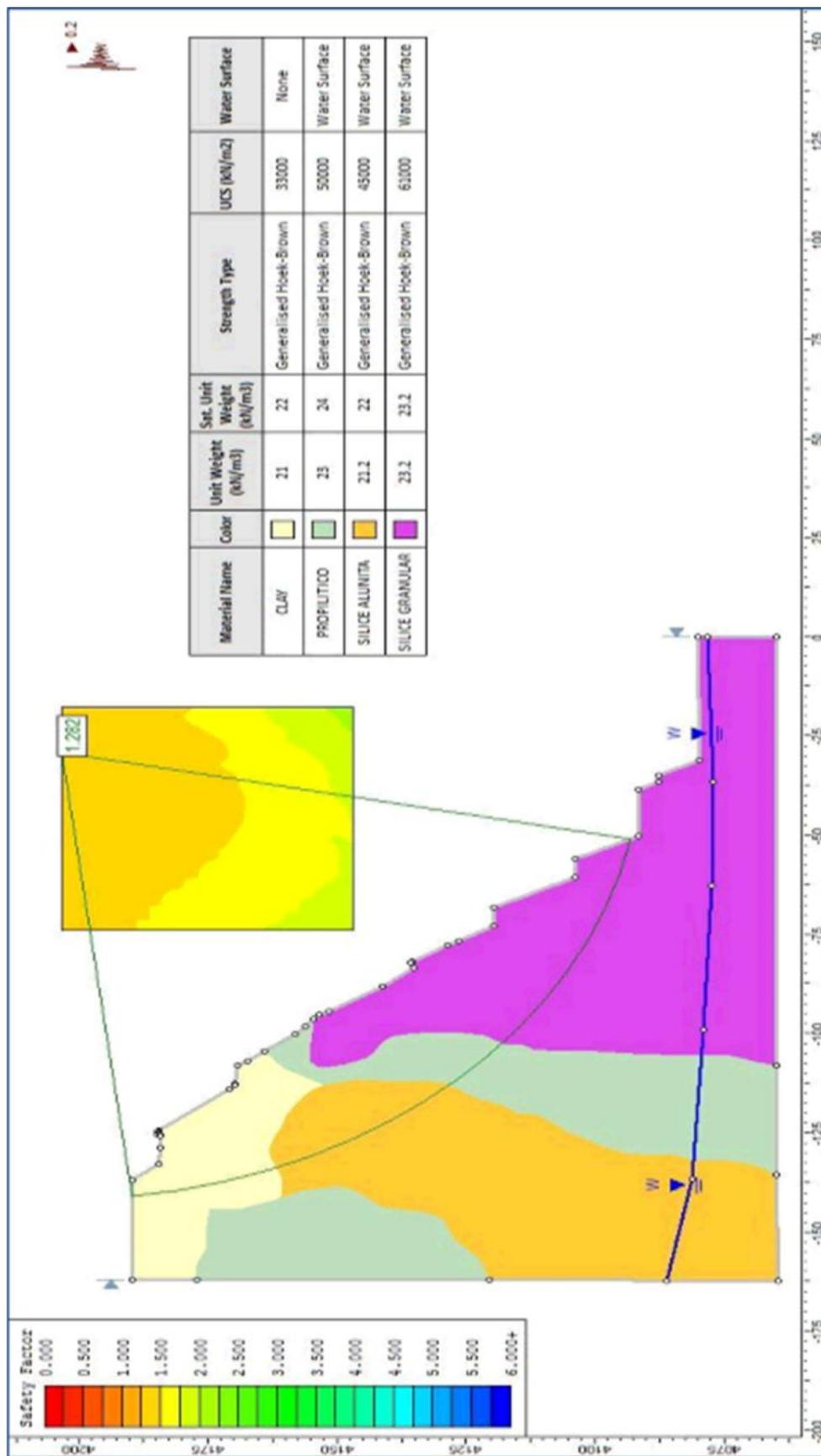


Figura 5.46. Sección B-B' Factor de seguridad pseudo estático 1.282.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

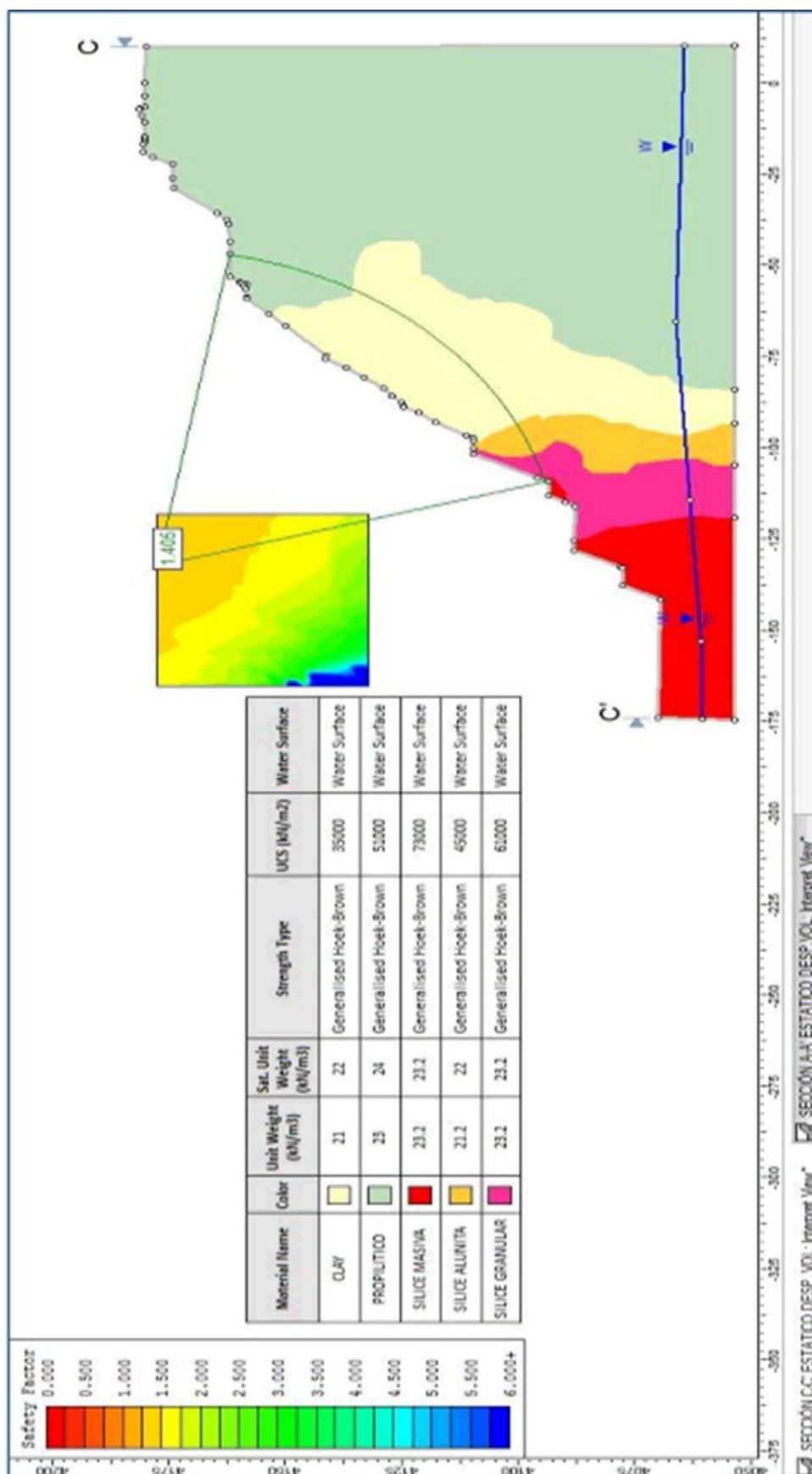
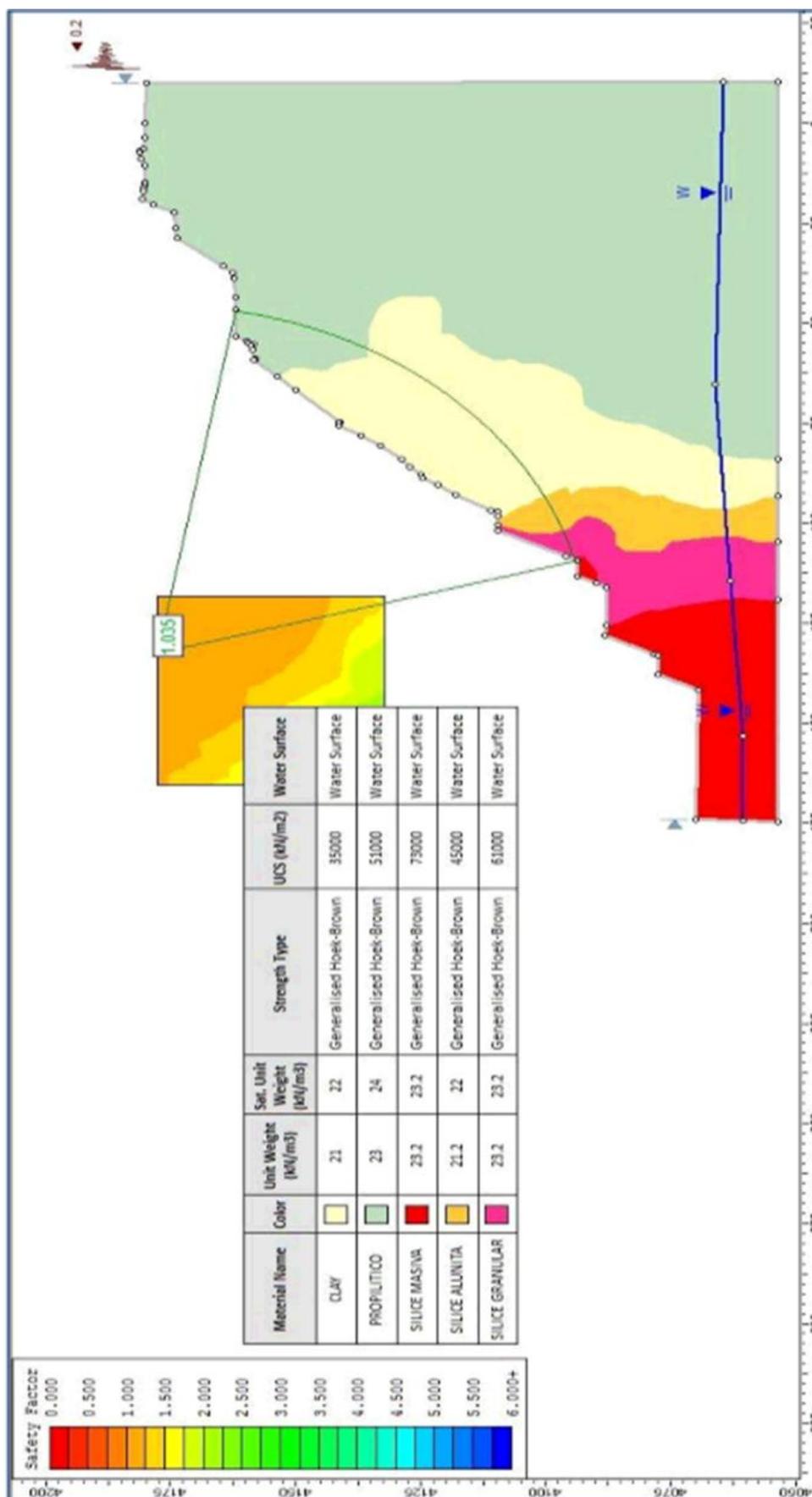


Figura 5.47. Sección C-C' Factor de seguridad estático 1.405.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



**Figura 5.48.** Sección C-C' Factor de seguridad pseudo estático 1.035.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.

### 5.2.19 Resumen de factor de seguridad

Ver Tabla 5.15

**Tabla 5.15.** Factor de seguridad según los cortes.

Factor de seguridad				
	Antes		Después	
	Estático	Pseudoestático	Estático	Pseudoestático
A-A'	1.446	1.075	1.433	1.064
B-B'	1.658	1.316	1.620	1.282
C-C'	1.405	1.050	1.405	1.035

Fuente. U.M. Apumayo S.A.C.

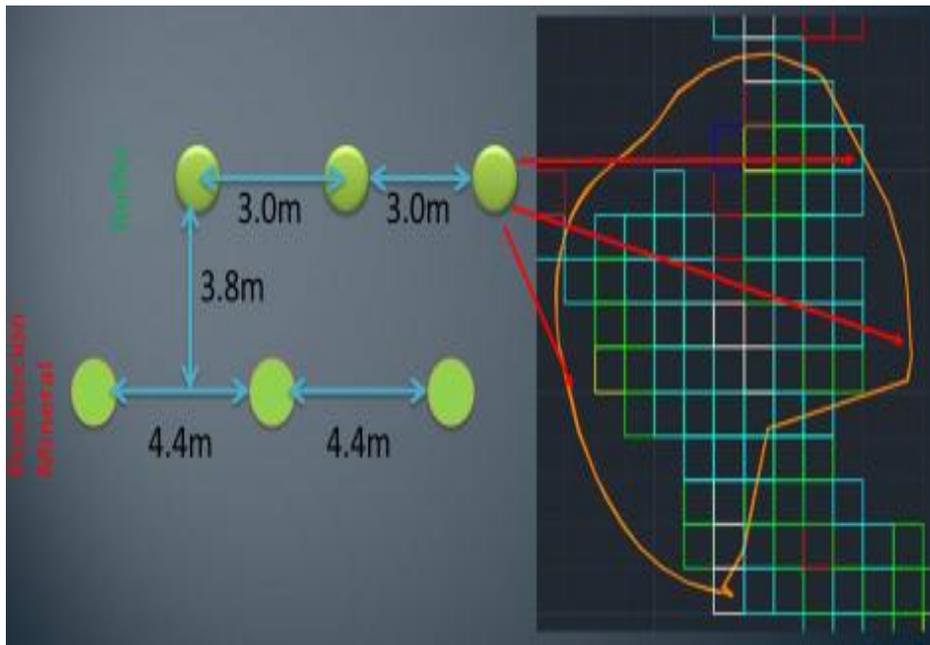
### 5.2.20 Análisis de factor de seguridad antes la optimización de fragmentación

#### P80

Los resultados se muestran en Tabla 5.15, en donde se observan valores de factor de seguridad para estático y pseudo estático antes y después de la voladura en ningún caso se puede apreciar que los valores de factor de seguridad son inferiores a 1, en la condiciones geomecánicas dadas los resultados muestran un comportamiento estable.

### 5.2.21 Diseño de la malla de perforación

Las distancias de taladros son diferentes los cuales han sido determinados por el área de geotecnia las sugerencias han sido por la variedad en calidad del macizo rocoso muy alterados conformados por sílice masiva (SM), sílice granular (SG), sílice alunita (SA), propilítico (PROP), sílice clay (SC) y clay (C), en toda la zona de los bancos de producción no obstante que la calidad del macizo rocos es regular conforme la valoración realizada y las sugerencias de Bieniawski 1989, tal como se observa en Figura 5.49, conforme al diseño mostrada en Figura 5.50. y la secuencia de salida tal como se observa en Figura 5.51, Figura 5.51a, Figura 5.52, 5.52a.



**Figura 5.49.** Malla de perforación.

Fuente. Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

5.2.22 Diseño de carga de voladura

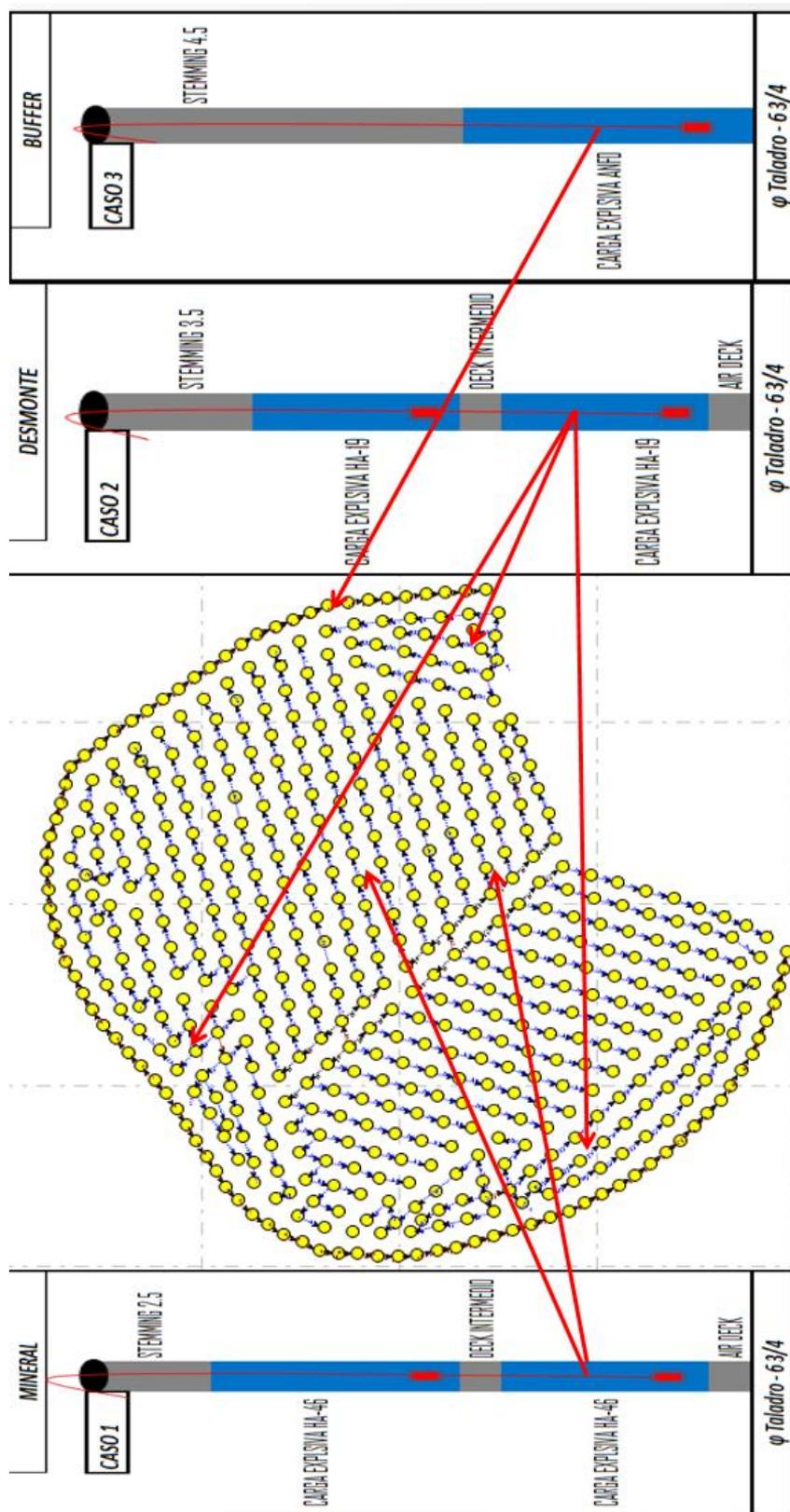
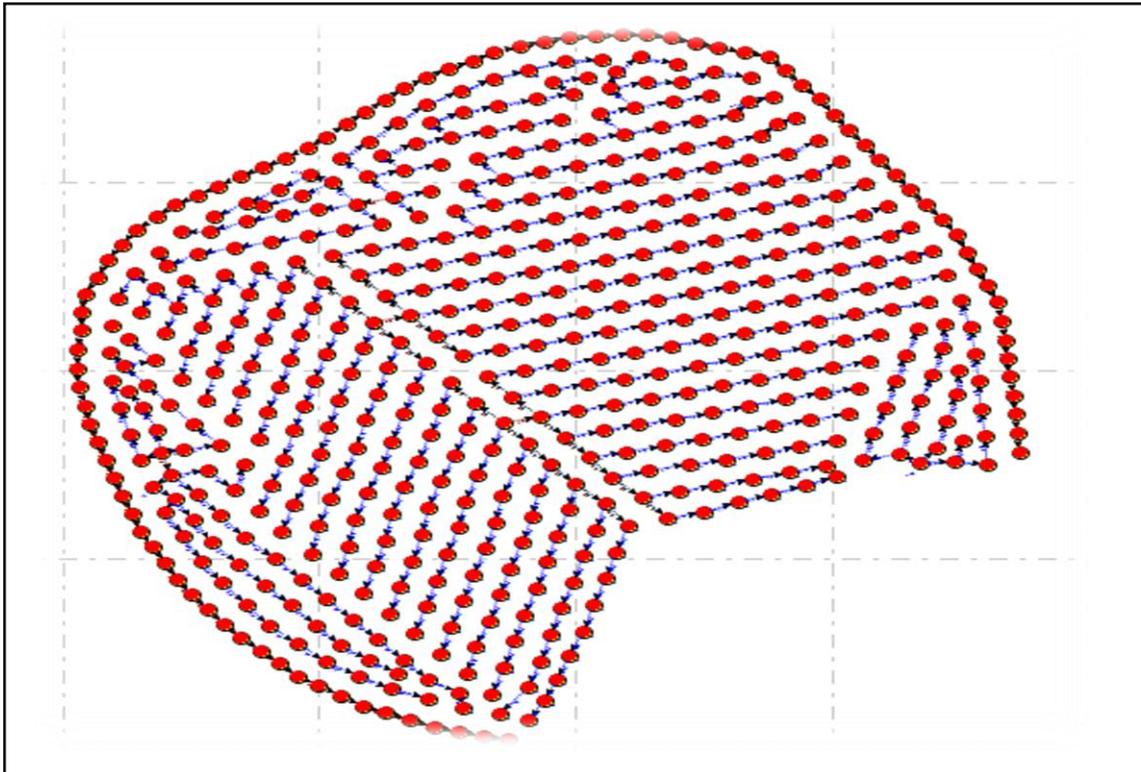


Figura 5.50. Diseño de amarre de banco-4112 py 05.

Fuente. Área de Geomecánica y geotecnia de Tajo Apumayo Sur.



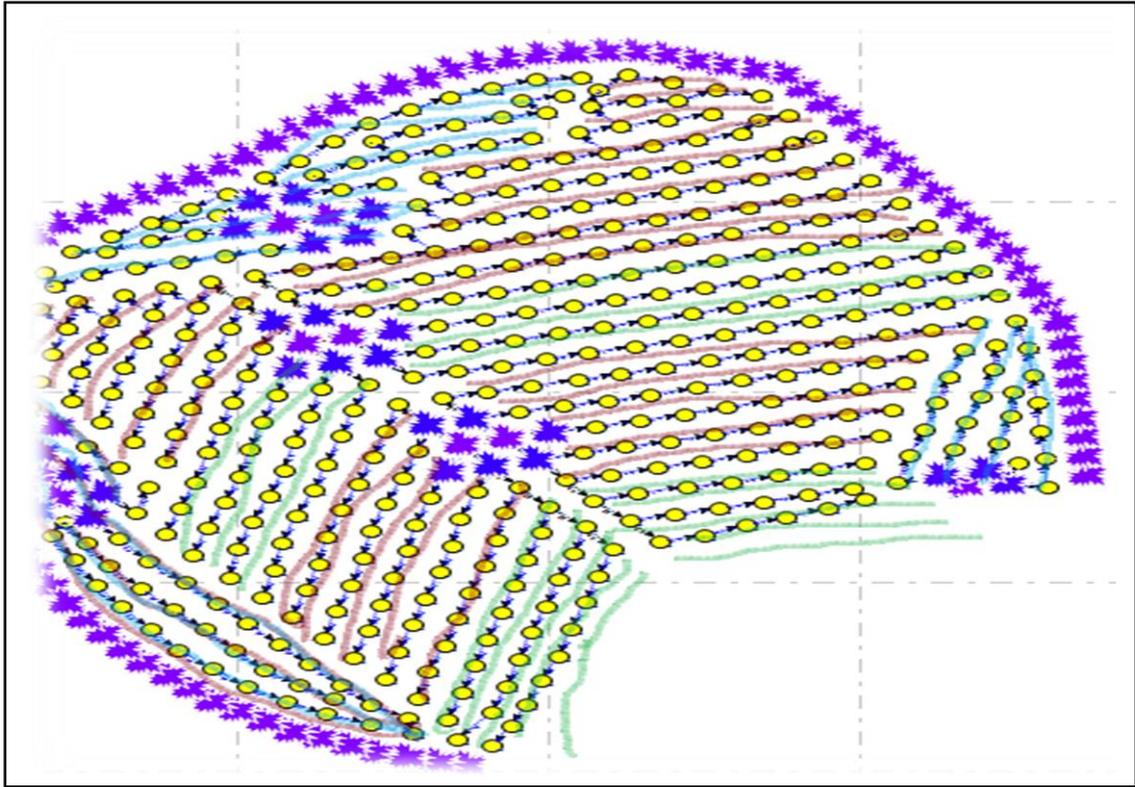
**Figura 5.51.** Simulación de voladura banco 4112-PY 05.

Fuente. Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.



**Figura 5.51a.** Proyecto de voladura en banco 4112-PY 05.

Fuente Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.



**Figura 5.52.** Simulación de pre voladura banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

### 5.2.23 Imagen después de la voladura



**Figura 5.52a.** Resultado de fragmentación después de la voladura banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

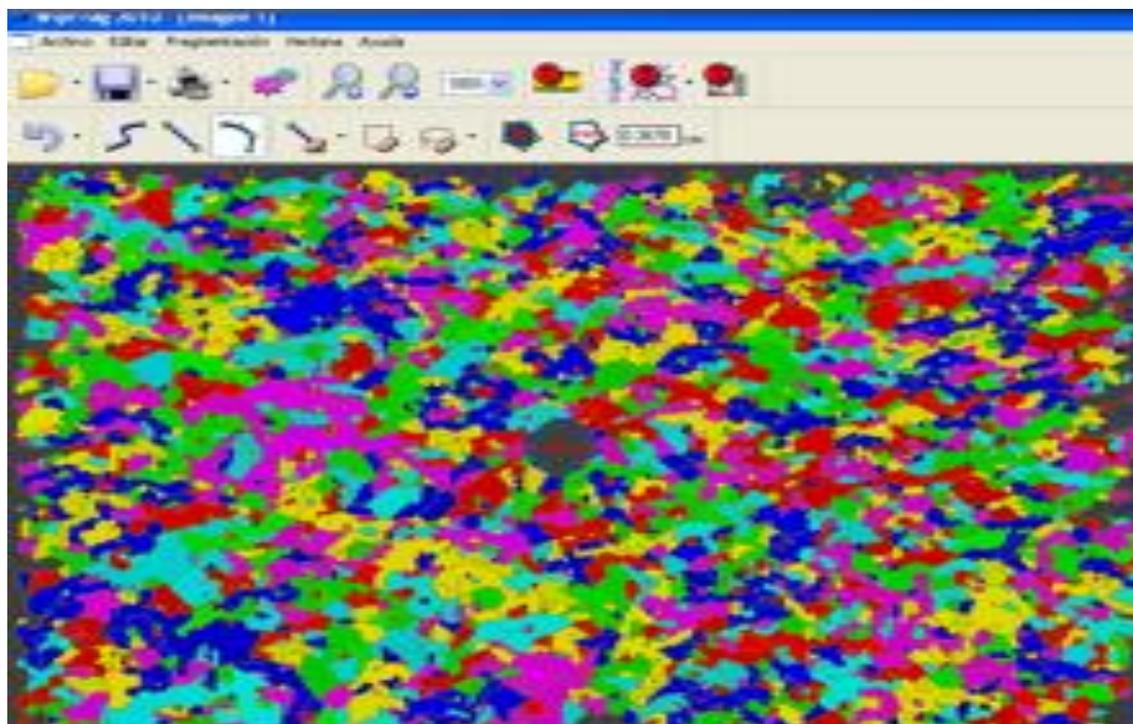
### 5.2.24 Análisis de fragmentación - Imagen prueba 1

Ver Figuras 5.53 hasta 5.55 y Tabla 5.16.



**Figura 5.53.** Imagen fragmentación con Wip frag voladura banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.



**Figura 5.54.** Simulación de fragmentación prueba 1 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

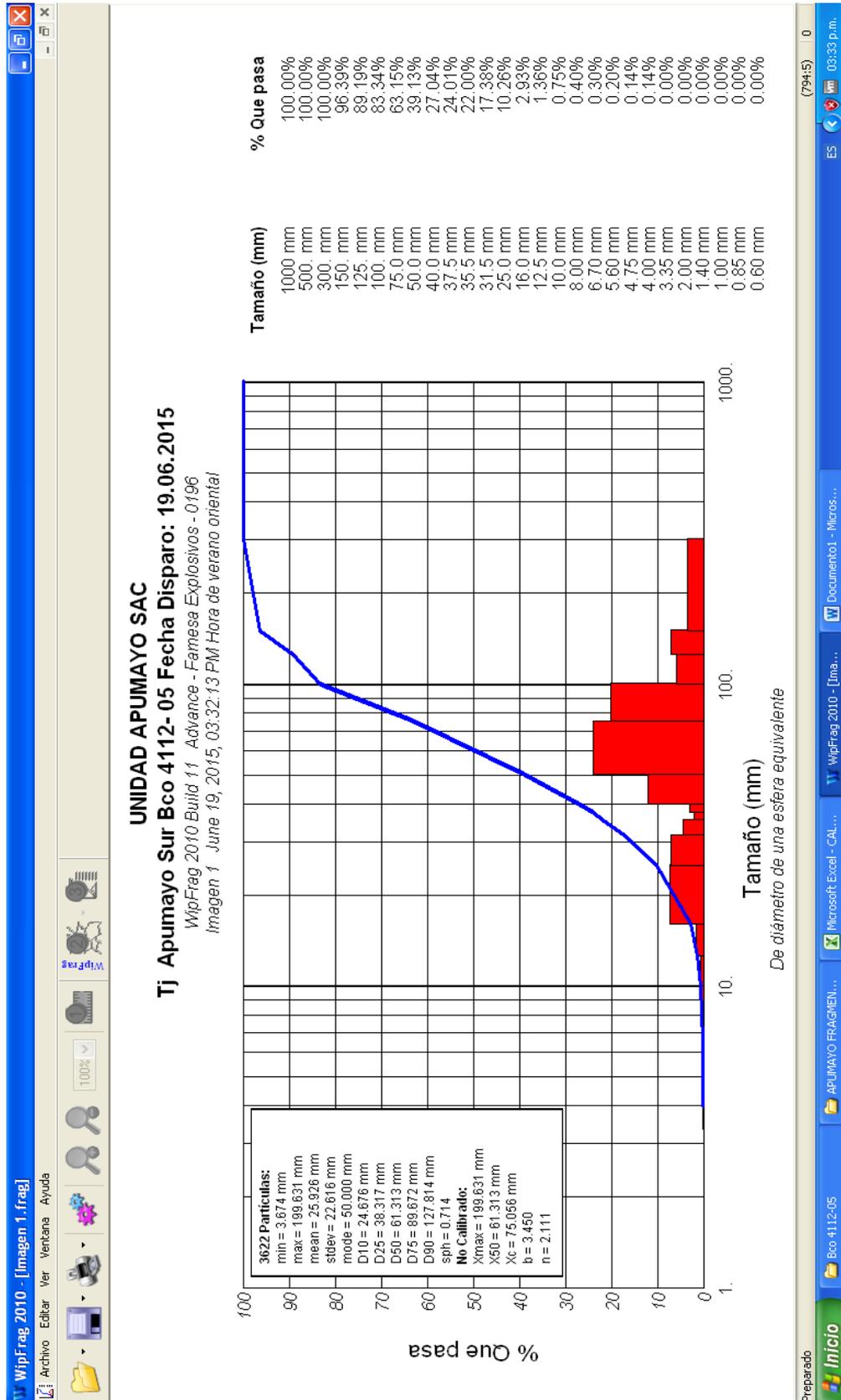


Figura 5.55. Trama histográfica prueba 1 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

**Tabla 05.16.** Fragmentación P80 prueba 1.

P80 (1)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	127.814	12.7814	5.03204724	Tamaño Max.	199.631	19.9631	7.86
P%	75	89.672	8.9672	3.5303937	Tamaño Min.	3.674	0.3674	0.14
P%	<b>80</b>	<b>102.39</b>	<b>10.24</b>	<b>4.03</b>	Moda	50	5	1.97

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

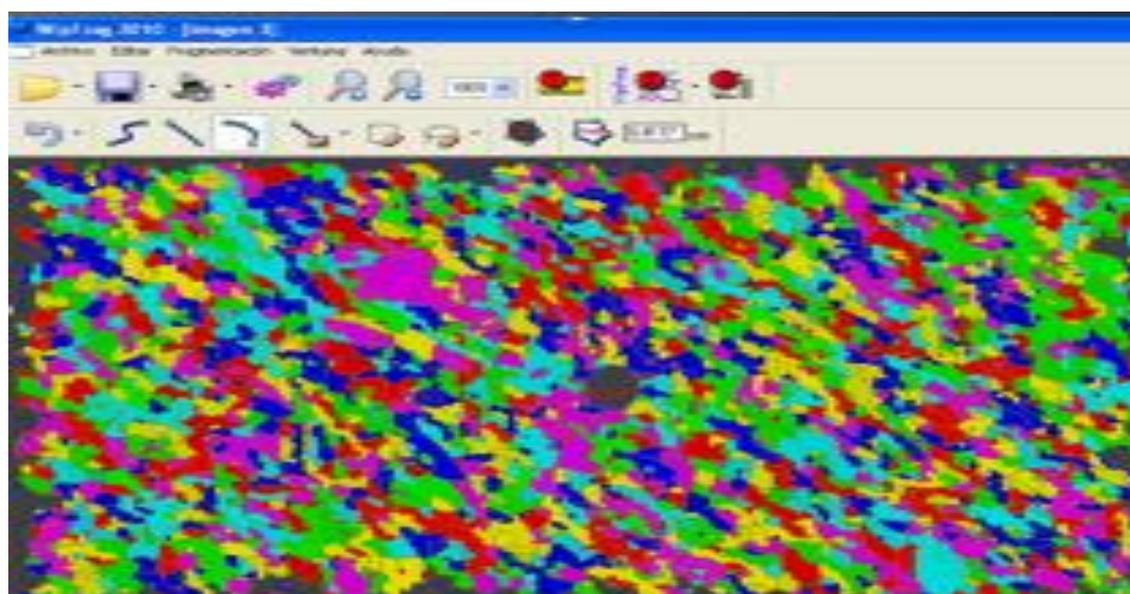
### 5.2.25 Análisis de fragmentación imagen prueba 2

Ver Figuras 5.56 hasta 5.58 y Tabla 5.17.



**Figura 5.56.** Imagen de fragmentación en Wip frag prueba 2, banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.



**Figura 5.57.** Simulación de fragmentación prueba 2 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

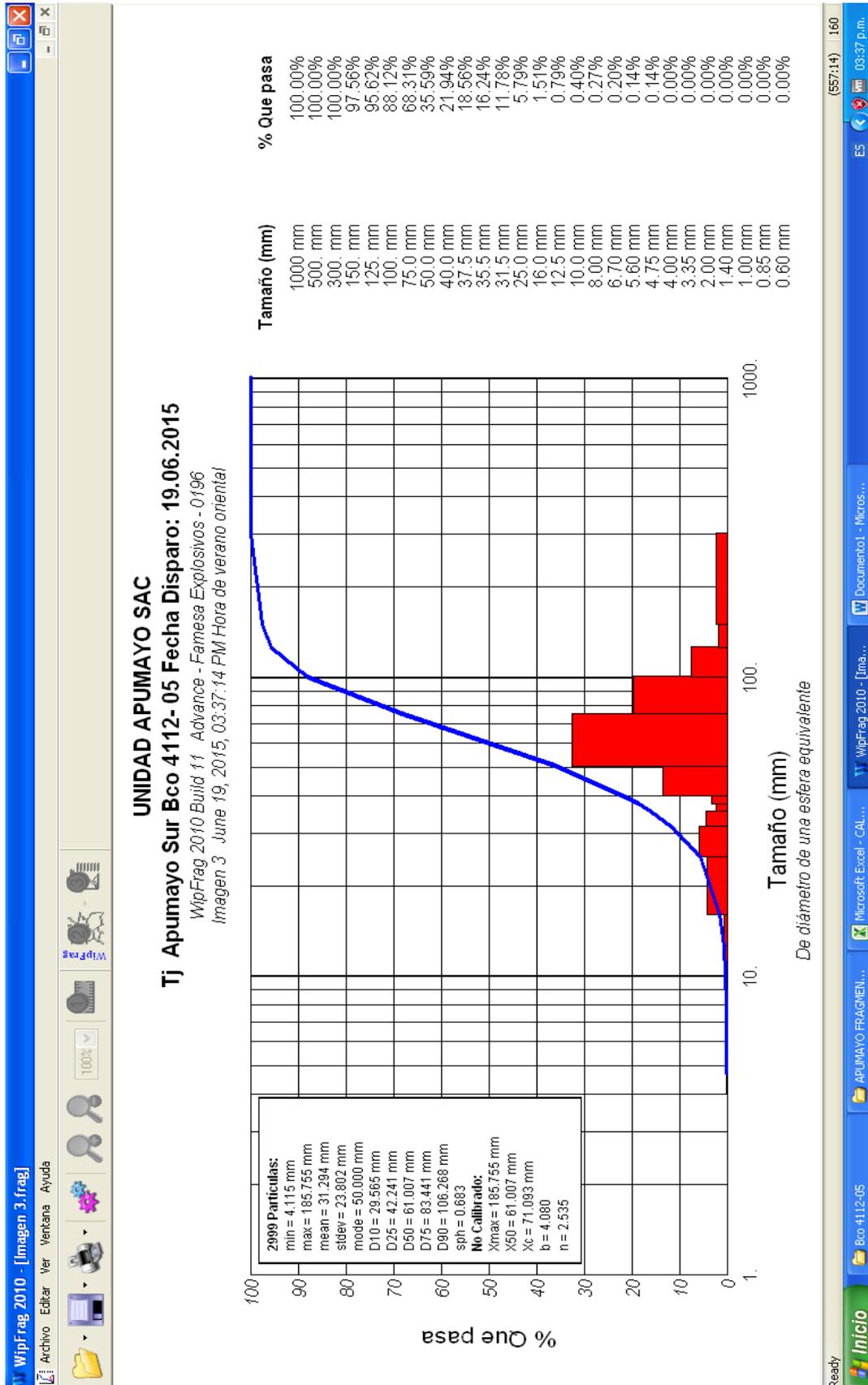


Figura 5.58. Trama histografica prueba 2 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

**Tabla 5.17.** Resultado de fragmentación p 80 Prueba 2.

P80 (2)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	106.268	10.6268	4.18377953	Tamaño Max.	185.755	18.5755	7.31
P%	75	83.441	8.3441	3.28507874	Tamaño Min.	4.115	0.4115	0.16
P%	<b>80</b>	<b>91.05</b>	<b>9.11</b>	<b>3.58</b>	Moda	50	5	1.97

Fuente. Autor de tesis.

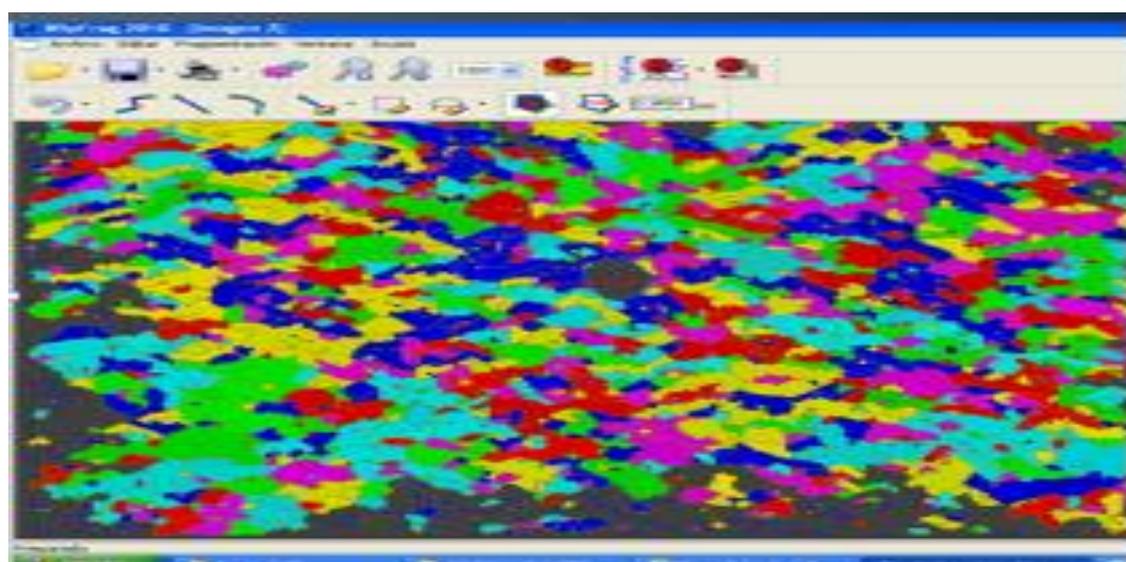
### 5.2.26 Análisis de fragmentación-imagen prueba 3

Ver Figuras 5.59 hasta 5.61 y Tabla 5.18.



**Figura 5.59.** Imagen de fragmentación con Wip frag prueba 3, banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.



**Figura 5.60.** Simulación de fragmentación prueba 3 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

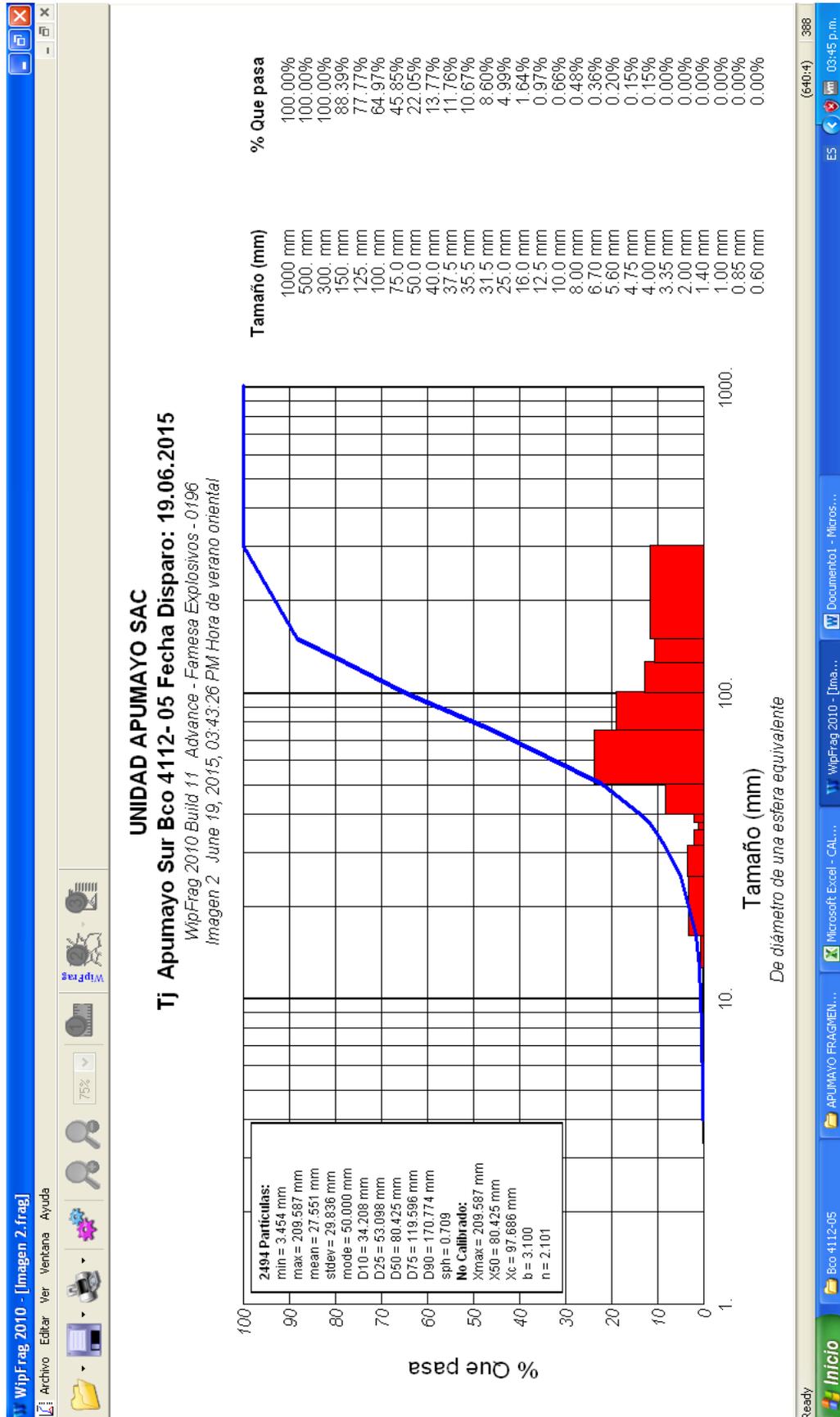


Figura 5.61. Trama histográfica 03 con Wip frag en banco 4112-PY 05.

Fuente. Área Geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

**Tabla 5.18.** Resultado de fragmentación p 80 Prueba 3.

P80 (3)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	170.774	17.0774	6.72338583	Tamaño Max.	209.587	20.9587	8.25
P%	75	119.596	11.9596	4.70850394	Tamaño Min.	3.454	0.3454	0.14
P%	<b>80</b>	<b>136.66</b>	<b>13.67</b>	<b>5.38</b>	Moda	50	5	1.97

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

### 5.2.27 Resumen de análisis de fragmentación

Ver Tabla 5.19

**Tabla 5.19.** Resumen de análisis de fragmentación P80 de tres pruebas.

P80 (1)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	127.814	12.7814	5.03204724	Tamaño Max.	199.631	19.9631	7.86
P%	75	89.672	8.9672	3.5303937	Tamaño Min.	3.674	0.3674	0.14
P%	<b>80</b>	<b>102.39</b>	<b>10.24</b>	<b>4.03</b>	Moda	50	5	1.97

P80 (2)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	106.268	10.6268	4.18377953	Tamaño Max.	185.755	18.5755	7.31
P%	75	83.441	8.3441	3.28507874	Tamaño Min.	4.115	0.4115	0.16
P%	<b>80</b>	<b>91.05</b>	<b>9.11</b>	<b>3.58</b>	Moda	50	5	1.97

P80 (3)								
Porcentil		mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg
P%	90	170.774	17.0774	6.72338583	Tamaño Max.	209.587	20.9587	8.25
P%	75	119.596	11.9596	4.70850394	Tamaño Min.	3.454	0.3454	0.14
P%	<b>80</b>	<b>136.66</b>	<b>13.67</b>	<b>5.38</b>	Moda	50	5	1.97

	Pulg
P80 (1)	4.03
P80 (2)	3.58
P80 (3)	5.38
P80 Promedio	4.33

Fuente. Área geomecánica – U.M. Apumayo SAC.

### 5.2.28 Análisis de resultados de fragmentación P80 antes de optimización de fragmentación

Se han elaborado tres pruebas de análisis de fragmentación mediante el software Wip frag, los resultados se pueden observar en Tabla 5.19 en donde P80(1) es 4.03 pulgadas, el P60(2) es 3.58 pulgadas y P80(3) es 5.38. Representa la fragmentación en operación mina cuyos resultados no son satisfactorios por lo que se requiere una fragmentación óptima.

### 5.2.29 Evaluación de los indicadores de la variable dependiente

Ver Tabla 5.20.

**Tabla 5.20.** Indicadores de la variable dependiente.

Variable dependiente	Optimización del tamaño de fragmentación de roca y análisis de estabilidad e integración de datos en curva granulométrica en Wip frag 2010.	Análisis de estabilidad antes de voladura	Numérico
		Análisis de estabilidad después de voladura.	Numérico
		Porcentil P80.	Pulgadas
	Escenario N°2: Tamaño de fragmentación con Wip frag 2010 en proceso productivo. Después de la optimización.	Análisis de estabilidad antes de voladura	Numérico
		Análisis de estabilidad después de voladura.	Numérico
		Porcentil P80.	Pulgadas

Fuente. Autor de tesis.

### **5.2.30 Optimización de la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica con software Wip Frag 2010 Banco 4128- Proyecto 10**

El objetivo principal es la verificación de la estabilidad en el Tajo Apumayo y buena obtención granulométrica que corresponde al Proyecto de Perforación 10 del Banco 4128.

### **5.2.31 Descripción de tajo Apumayo Sur (BC4128-PY10)**

- En la zona de los BC4128 - PY10, se encuentra material arcilloso el cual está saturado debido a las constantes lluvias que se presentan a la fecha.
- Se encuentra agrietamiento en las paredes de los taludes BC4128 - PY10, teniendo roca de calidad según RMR de mala a regular.

### **5.2.32 Análisis de estabilidad de taludes Sección (A-A')**

**Metodología.** La metodología aplicada en la evaluación de la estabilidad comprende la siguiente documentación:

- Secciones de materiales de alteraciones proporcionado por Geología Apumayo.
- Caracterización básica de la geología del tajo existente proporcionado por Geotecnia. (GSI,  $m_i$ , Nivel freático).
- Topografía actual del Tajo Apumayo proporcionada por Topografía Apumayo.
- Topografía proyectada a la limpieza después de realizada la voladura.

### 5.2.33 Análisis de estabilidad con método de equilibrio límite

Para el análisis de la estabilidad de los taludes se ha considerado la sección transversal A-A'; se ha utilizado el programa de cómputo *Slide* (*Rocscience Inc*, 1989-2003) versión 6.005 para el cálculo del factor de seguridad por métodos de equilibrio límite. Este es un programa completamente integrado, que permite desarrollar la geometría del talud interactivamente y realiza el análisis de estabilidad taludes de deslizamiento circular y no circular en suelos o rocas con diferentes métodos. Para el presente análisis de estabilidad se ha utilizado el método de equilibrio límite de *GLE/Morgenstern-Price*.

Adicionalmente, se realizó un análisis pseudo-estático. En el análisis pseudo-estático, una carga sísmica (representada por una aceleración horizontal) es aplicada al centro de la masa de cada zona evaluada. En este caso, se usó una aceleración horizontal de 0.20g.

### 5.2.34 Factores de seguridad mínimos

Para los taludes generales finales, el criterio adoptado es considerar un factor de seguridad mínimo de 1.4 para condiciones estáticas y considerando el efecto sísmico es decir en condiciones pseudo-estáticas 1.0. Se debe considerar las restricciones respectivas como son: Ver Tabla 5.21.

- La presencia de agua.
- La presencia de los esfuerzos o presiones de roca del terreno.
- La presencia de fallas principales

**Tabla 5.21.** Resultados de factor de seguridad mínimo.

<b>FACTOR DE SEGURIDAD MINIMO</b>	
<b>Estático</b>	<b>Pseudoestático</b>
1.4	<b>1.0</b>

Fuente. Autor de tesis.

**5.2.35 Análisis de estabilidad para la situación actual: (antes de la voladura)**

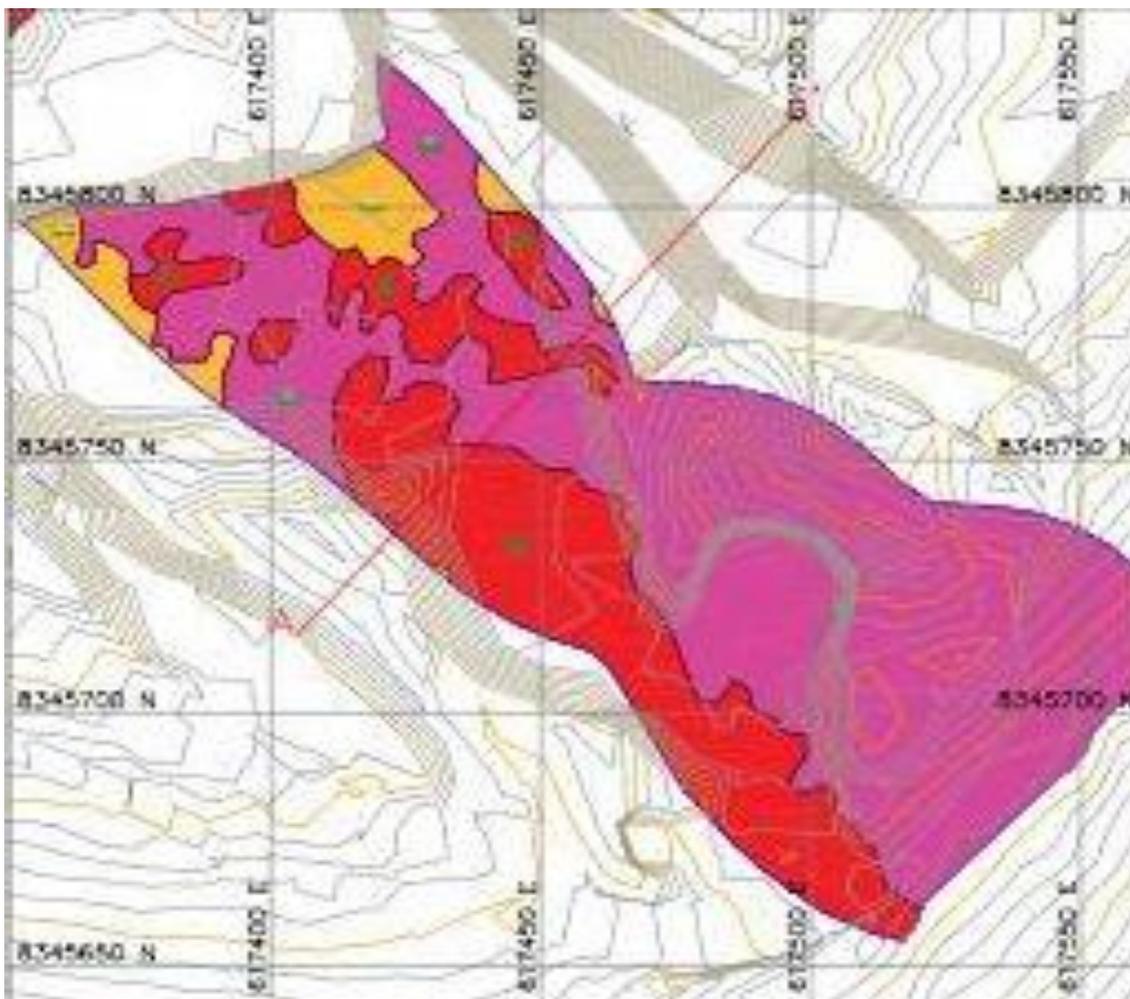
En el siguiente cuadro se muestra los parámetros de resistencia de la masa rocosa usados en el análisis de estabilidad. Ver Tabla 5.22 y Figura 5.60.

**Tabla 5.22.** Parámetros de resistencia de la masa rocosa-Tajo Apumayo Sur.

<b>Alteración</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Peso unitario saturado</b>	<b>RCU(MPa)</b>
Sílice Alunita	<b>(SA)</b>	21.2	22
Clay	©	21	22
Propilítico	<b>(PRO)</b>	23	24
Sílice Granular	<b>(SG)</b>	23.2	23.2
Sílice Masiva	<b>(SM)</b>	23.2	23.2

Fuente. Autor de tesis.

Se realizó el análisis de estabilidad en la siguiente línea de sección crítica A-A'.



**Figura 5.60.** Tajo Apumayo Sur Banco 4128- Proyecto 10.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.36 Análisis de estabilidad para la situación actual (antes de la voladura)

Con los resultados de los análisis de estabilidad evaluados en la sección crítica se concluye que la zona se encuentra estable, debido a que la sección analizada muestra un factor de seguridad por encima del mínimo requerido. Ver Tabla 5.23.

**Tabla 5.23.** Factor de seguridad sección A-A' antes de la voladura.

TAJO APUMAYO		
Factor de seguridad banco 4128 PY-10 ( antes de voladura)		
ACTUAL		
SECCION	ESTÁTICO	PSEUDOESTÁTICO
A-A	1.765	1.237

Fuente. Autor de tesis.

**5.2.37 Resultados obtenidos para la situación actual: (después de voladura)**

Se realizó la voladura del PY10 - BC4128, luego de ella se evaluó las condiciones de los taludes con la topografía resultante, obteniendo resultados menores a los factores de seguridad obtenidos antes de la voladura. Ver Tabla 5.24.

**Tabla 5.24.** Resultados del análisis de estabilidad con la topografía después de la voladura.

TAJO APUMAYO		
Factor de seguridad banco 4128 PY-10 (después de voladura)		
ACTUAL		
SECCIÓN	ESTÁTICO	PSEUDOESTÁTICO
A- A'	1.418	1.046

Fuente. Autor de tesis.

En el análisis de estabilidad, se consideró los diferentes tipos de rocas silisificadas como muestras aleatorias, Por ser los estratos de alteración de mayor significancia.

- Sílice Masiva (SM).
- Sílice Granular (SG).
- Sílice Alunita (SA), PROP.
- Propilítico (PROP).
- Sílice Clay (SC).
- Clay (C).

### 5.2.38 Parámetros de perforación y voladura utilizados en la voladura

**Perforación.** En la perforación se utiliza dos perforadoras DM45E, con martillo de fondo y el diámetro de perforación es de 6 3/4" y la altura de perforación es de Nueve metros, el cual incluye 1 m de sobre perforación para obtener un piso uniforme. La penetración de la broca en la roca se logra por parámetros de presión de empuje y velocidad de rotación; el barrido del detritus se realiza mediante aire comprimido.

La malla empleada depende de la densidad de la roca, densidad del explosivo y la formación del macizo rocoso. Las mallas a utilizar están en función a parámetros técnicos las cuales son:

- Malla para precorte N°1 2.5 x 3.00m. - Roca in situ (media suave y duro).
- Malla Triangular N° 2: 3.80 x 4.40 m. – Roca in situ (media suave).
- Malla Triangular N° 2: 3.70 x 4.20 m. – Roca in situ (dura).

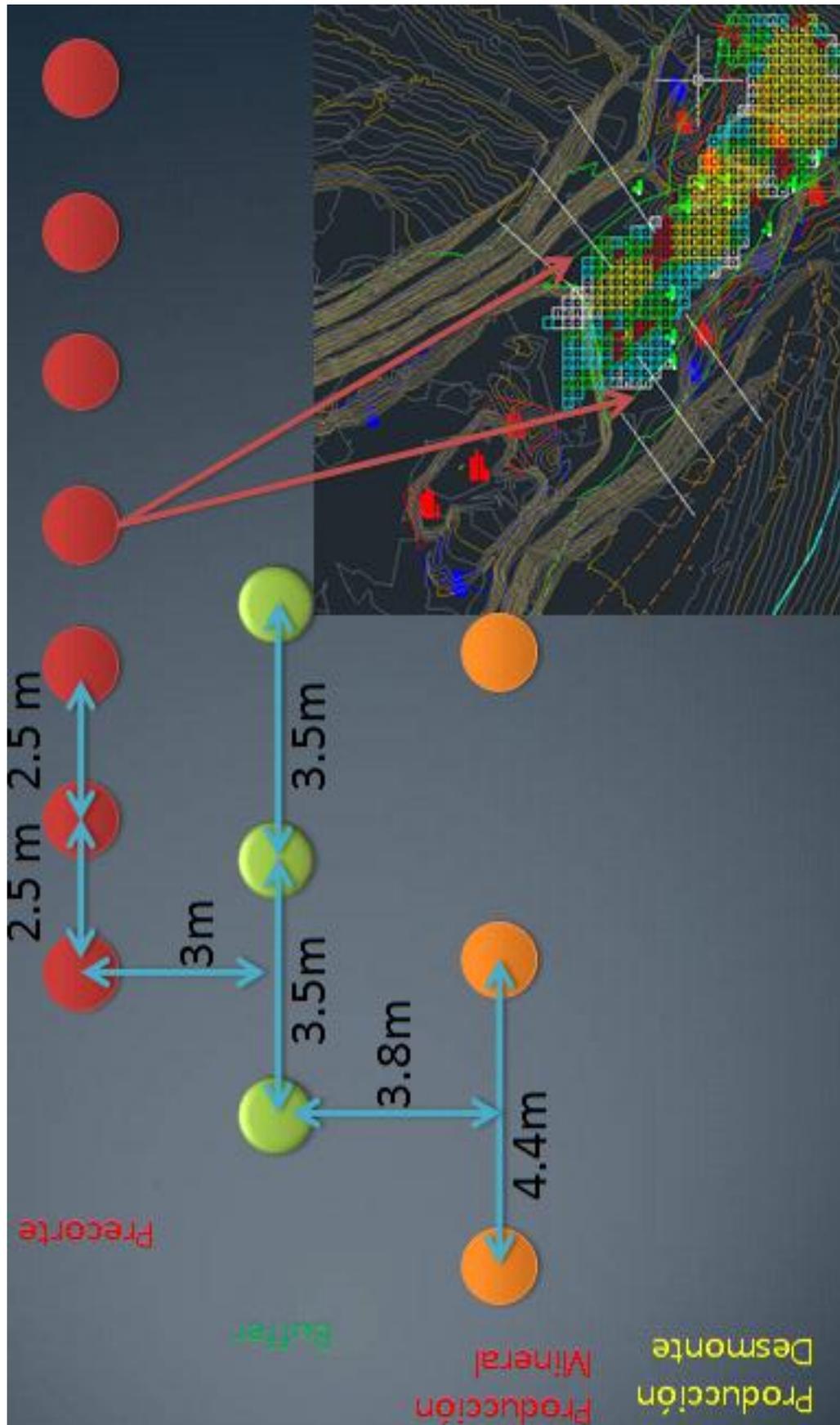
El diseño de la malla de perforación es un factor sumamente importante puesto que cualquier buen resultado de la voladura es mérito de una buena malla (Burden y espaciamiento) y su adecuada perforación (perforar en el punto) además mucho depende de una correcta limpieza de las áreas a perforar y señalización. El monitoreo de la operación se realiza día a día a través de un sistema de control de producción y performance de equipos (velocidad de perforación, fragmentación de rocas por voladura, velocidad de carguío, ciclos de acarreo, TM/h; TM/ciclo; disponibilidad y utilización de equipos, costos unitarios en cada operación unitaria) manipulado por un supervisor. La información obtenida nos permite calcular los rendimientos e identificar desviaciones con respecto a lo planeado y tomar acciones correctivas en el momento. Las principales variables medidas para las perforadoras son: Productividad,

disponibilidad mecánica, utilización, factor de uso, vida útil de accesorios de perforación (brocas y aceros de perforación) Estas variables son medidos y revisados por la supervisión en base horaria, por guardia, semanal, acumulado mensual y acumulado anual.

**Voladura.** El objetivo es fragmentar el macizo rocoso a través de agentes de voladura, mediante el siguiente proceso: Para iniciar utilizamos boosters de 1 libra y booster de ½ libra, ambos con líneas descendentes no eléctricos con tiempos medidos en milisegundos. El carguío de los taladros es mecanizado se utiliza un camión fábrica que realiza las mezclas de Anfo y Heavy Anfo que nos permite utilizar diferentes tipos de explosivos, según las consideraciones del material a fragmentar y el porcentaje de contenido de agua.

Posteriormente se tapan los taladros utilizando tacos de 2.5 metros. El chispeo se realiza convencionalmente utilizando mecha de seguridad de 8 pies con fulminante N° 8. Y personal para el trabajo de voladura. Ver Figura 5.61 y Tabla 5.25.

En lo que respecta a este tema se realizan los siguientes controles: Calibración de camión mezclador (semanalmente), medición de densidad de nitrato (mensualmente), medición de dispersiones de faneles duales y retardos (mensualmente). En lo que respecta al sistema de control y reportes realizados es: Consumo de nitrato y emulsión (diario), stock de material disponible en mina (diario), factor de potencia (por disparo), tiempo de demora por disparo de los principales equipos (por disparo), número de disparos (semanalmente) y tonelaje promedio volado por taladro y total (semanalmente).



**Figura 5.61.** Malla de perforación optimizado precorte, buffer y producción.

Fuente. Autor de tesis.

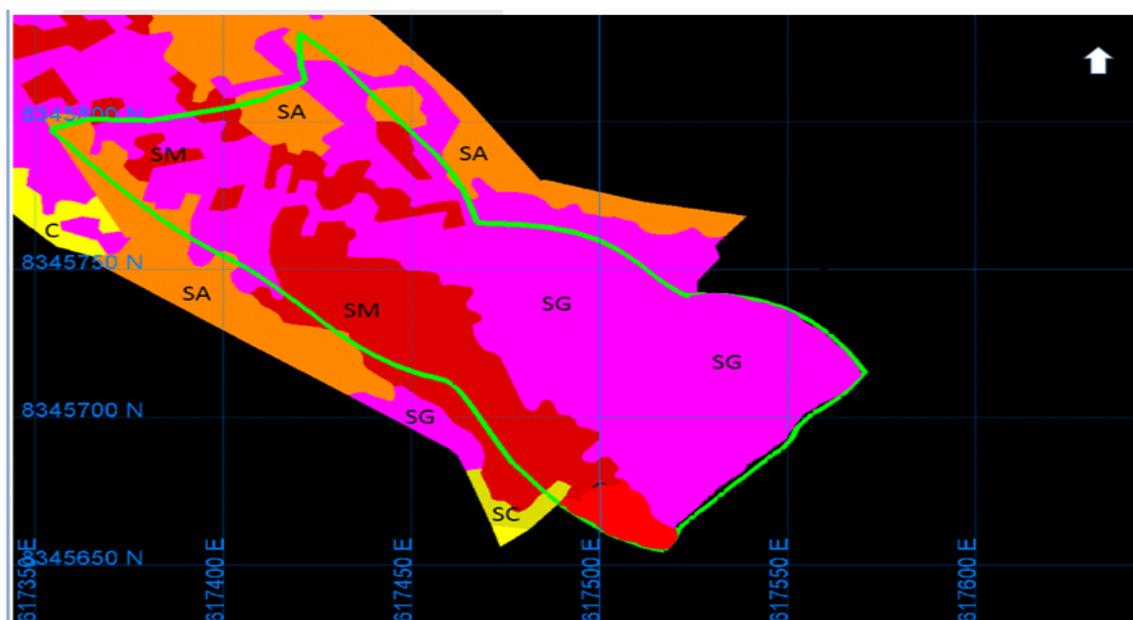
**Tabla 5.25.** Densidades según tipo de explosivo.

TIPO DE ANGENTE Y EXPLOSIVO	DENSIDAD (gr/cc)	TALADRO 6 3/4" DENSIDAD LINEAL (kg/ml)
AN "SASOL EXPAN™ 200"	0.70	
SAN "FAMESA"	1.30	
ANFO	0.76	17.7
HANFO 37	1.03	24.0
HANFO 46	1.20	28.0
HANFO 45/55	1.23	28.7
HANFO 55	1.25	29.2
HANFO 64	1.27	29.6

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.39 Las alteraciones del proyecto

Ahí se puede observar el proyecto de voladura con un porcentaje mayor de 75% de sílice granular con 20% de sílice masiva y 5% se sílice alunita, La geología apoya en reconocimiento de fracturas y brechas (sub verticales), también el sílice granular es predominante, esto ayuda a tomar decisiones sobre uso de aceros. Ver Figura 5.62.



**Figura 5.62.** Proyecto banco 4128-10.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.40 Diseño y armado de malla para la voladura por polígonos

Se trabaja con el plan minado y la secuencia de perforación de los proyectos, conforme se puede observar en la Figura 5.63.

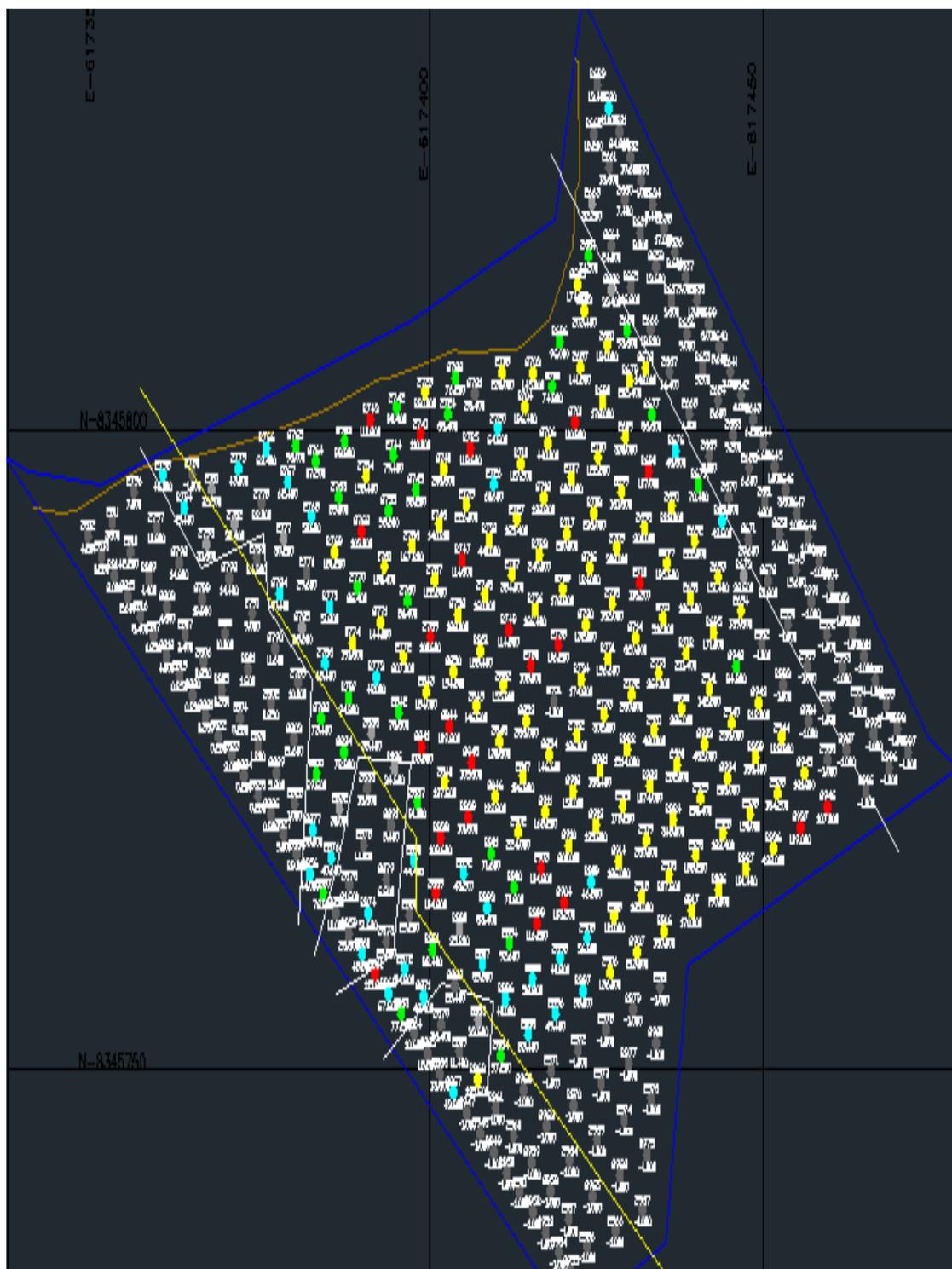


Figura 5.63. Malla para voladura por polígonos.

Fuente. Autor de tesis.

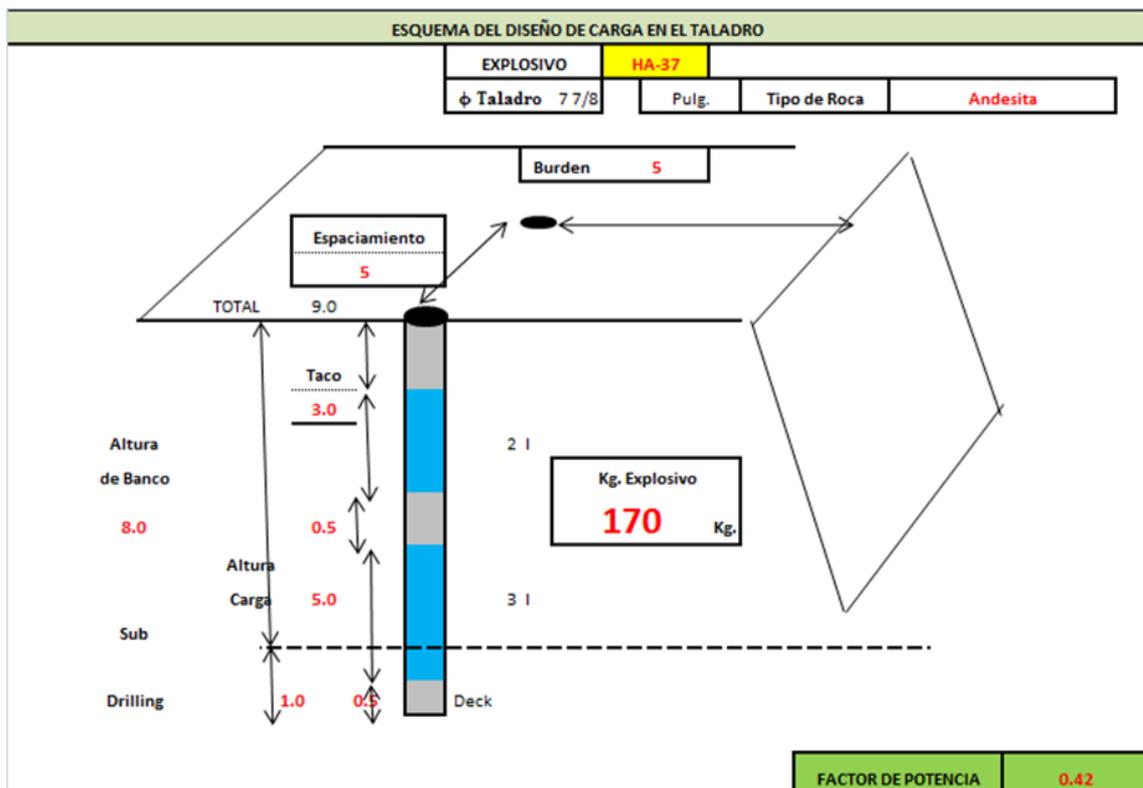
### 5.2.41 Diseño de carga en el proyecto de voladura

El diseño actual de carga en los taladros, nos permite controlar los pisos, y se consigue una mejor distribución de energía y ahorro de explosivos.

- 0.50 m en el fondo del taladro.
- Taco de 0.5 m en medio de taladro.
- Taco final de 3.0 m.

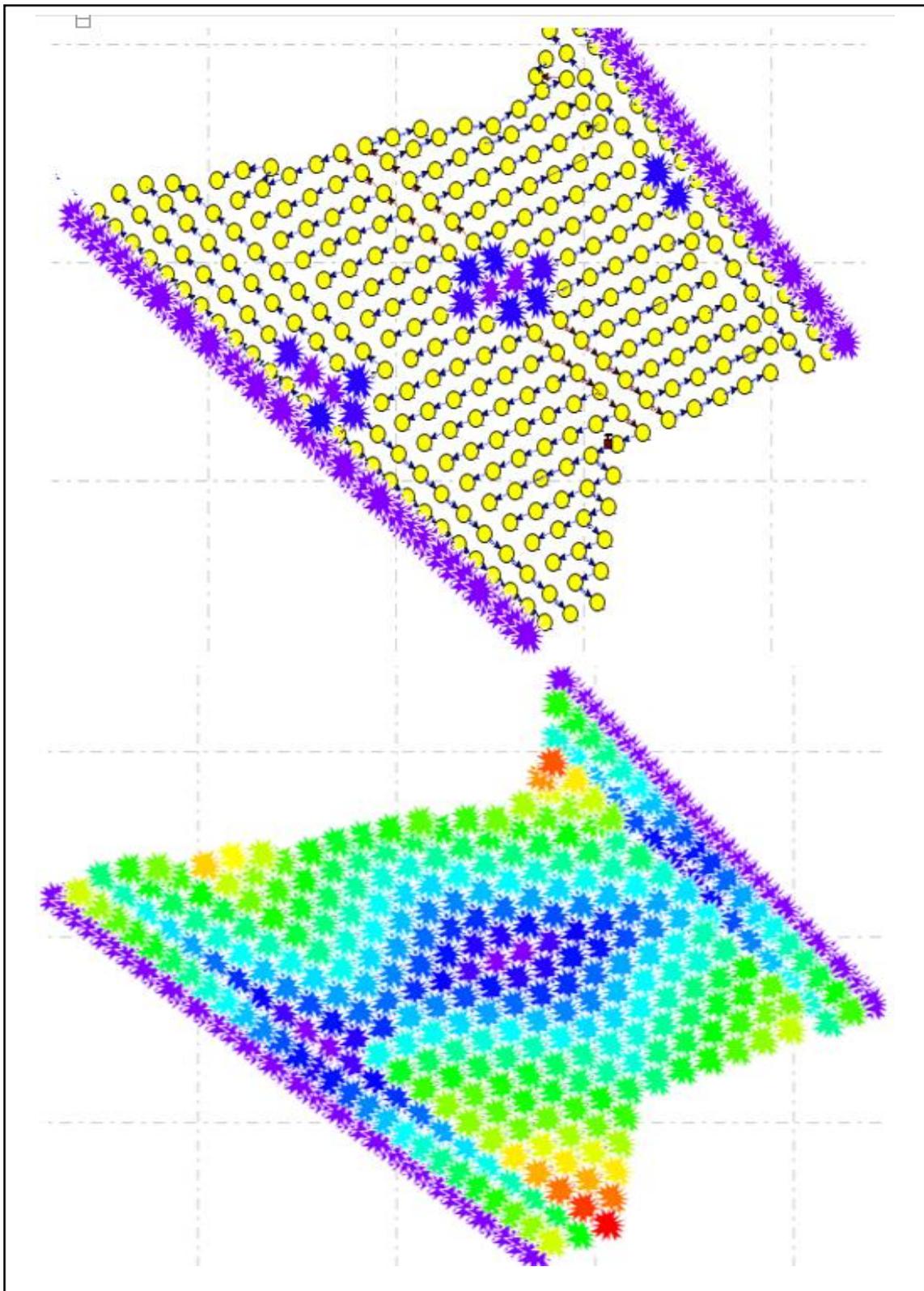
### 5.2.42 El diseño de amarre para la voladura y/o secuencia de salida

Todos los proyectos son simulados antes de la voladura con un software llamado I-BLAST. que nos permite ya visualizar la salida o el proceso o secuenciamiento de cada taladro, tal como se observa en la Figuras 5.64 y 5.65.



**Figura 5.64.** Esquema de diseño de carga en el taladro.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.65.** Diseño amarre y secuencia de salida de voladura.

Fuente. Autor de tesis.

**Resultados de la voladura.**

Los resultados se muestran en Tabla 5.25 y Figuras 5.65a y 5.65b.

**5.2.43 Parámetros aplicados y resultados de la voladura**

**Tabla 5.25.** Parámetros y resultados de voladura.

<b>1.00-PARAMETROS</b>		
1.01-ZONA DE VOLADURA		1
1.02-BANCO		4128
1.03-PROYECTO		10
1.04-MINERAL BURD.	m	3.8
1.05-MINERAL ESPAC.	m	4.4
1.06-MINERAL TACO	m	2.5
1.07-DESMONTE BURD.	m	4.2
1.08-DESMONTE ESPAC.	m	4.8
1.09-DESMONTE TACO	m	3.0
1.10-BUFFER	m	3.5
1.11-PRECORTE	m	2.5
<b>2.00-PARAMETROS DE VOLADURA</b>		
2.01-TALADROS VOLADOS	Uni	377
2.02-VOLUMEN	M3	46,612
2.03-TONELAJE	Tn	104,434
2.04-FACTOR DE POTENCIA	Kg/Tn	0.42
2.05-FACTOR DE CARGA	Kg/m3	0.9
<b>3.00-COSTO DE VOLADURA</b>		
3.01-GASTO EN EL PROYECTO	\$	38,022
3.04-COSTO POR TONELADA ROTA	\$/Tnr	0.36
<b>4.00-PARAMETROS DE PERFORACION</b>		
4.01-TALADROS PERFORADOS	Uni	377
4.02-METROS PERFORADOS	m	3,393
4.03-VELOCIDAD DE PENETRACION	mp/h	40
4.04-TALADROS POR HORA	Tal/h	4
<b>5.00-COSTO DE PERFORACION</b>		
5.01-GASTO EN EL PROYECTO	\$	23,349
5.02-COSTO POR METRO PERFORADO	\$/mp	8.65
<b>6.00-CONTROL</b>		
6.01-GRANULOMETRIA P80(") MINERAL	Pul	5
6.02-GRANULOMETRIA P80(") DESMONTE	Pul	10
6.03-DESPLAZAMIENTO DE CARA LIBRE	m	18
6.04-VDD		
6.05-FLY ROCK AREA AL CONTORNO	m	75

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.65a.** Resultados de la voladura.

Fuente. Autor de tesis.

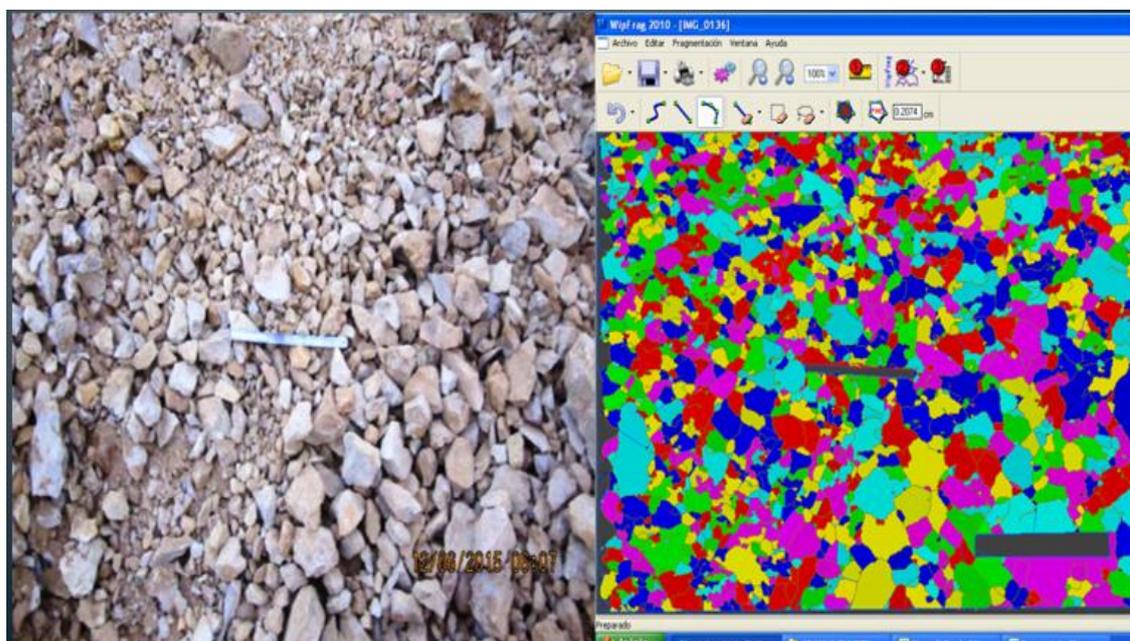


**Figura 5.65b.** Resultados de voldura de producción.

Fuente. Autor de tesis.

#### 5.2.44 Análisis de fragmentación granulométrico

El análisis de fragmentación se ha realizado con *Wip frag* 2010 tal como se observa en las Figuras 5.66, 5.67, 5.68, 5.69 y Tablas 5.26 y 5.27.



**Figura 5.66.** Imagen 02 de fragmentación con *Wip frag* 2010.

Fuente. Autor de tesis.

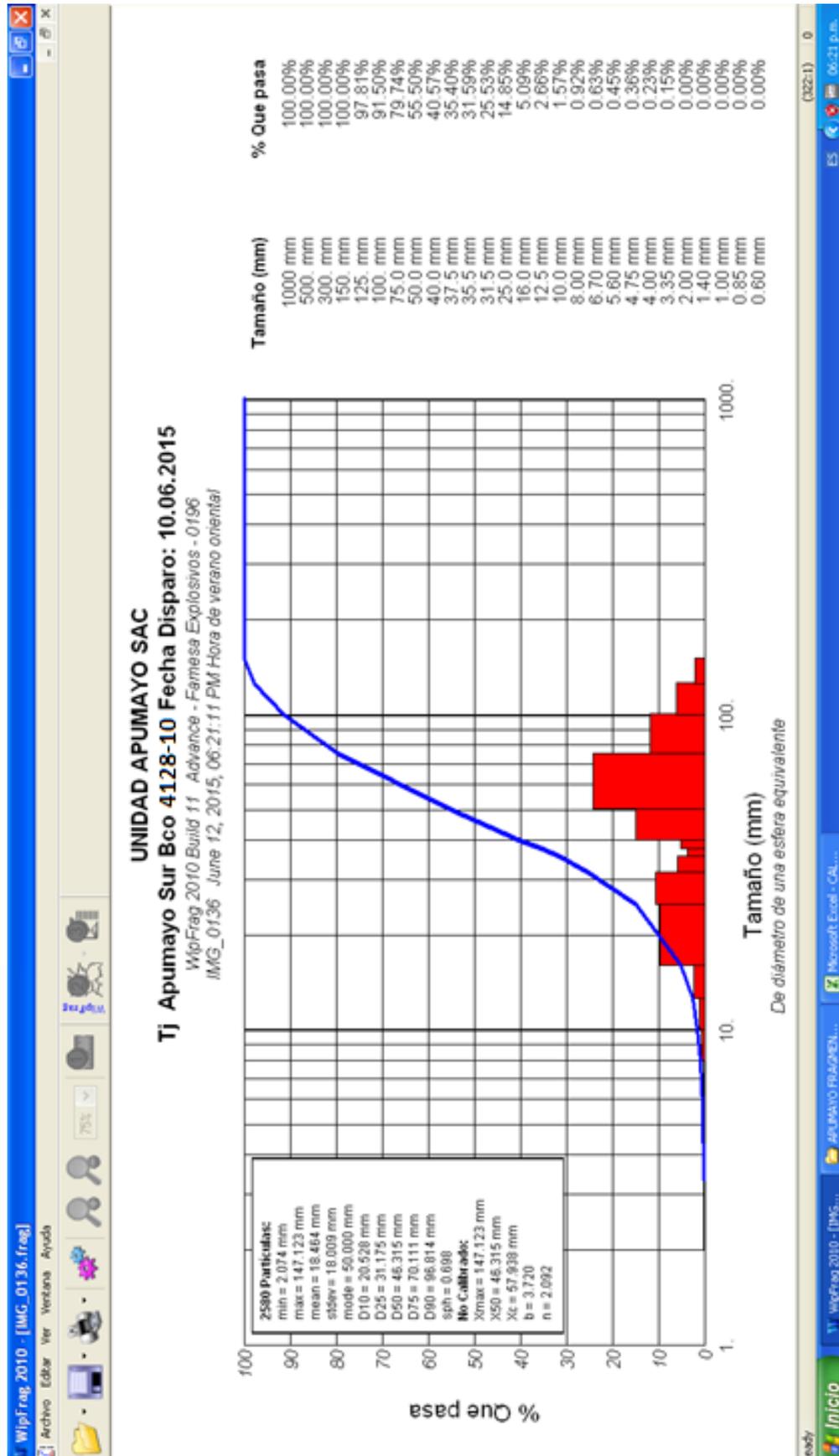


Figura 5.67. Resultados de fragmentación P80 en Wip frag 2010 prueba 1.

Fuente. Autor de tesis.

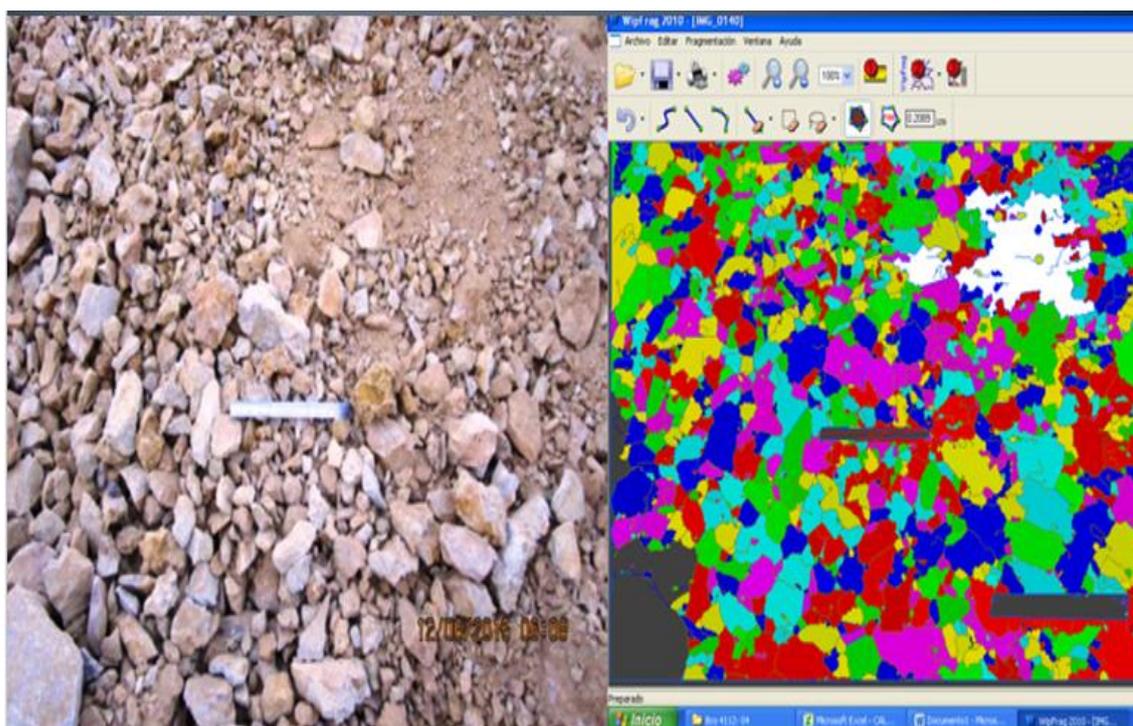


Figura 5.68. Imagen 02 de fragmentación con *Wip frag* 2010.

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.26. Fragmentación P80 prueba 1.

P80 (1)								
Porcentil	mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg	
P%	90	96.814	9.6814	3.8115748	Tamaño Max.	147.123	14.7123	5.79
P%	75	70.111	7.0111	2.76027559	Tamaño Min.	2.074	0.2074	0.08
P%	80	79.01	7.90	3.11	Moda	50	5	1.97

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.27. Fragmentación P80 prueba 1.

P80 (2)								
Porcentil	mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg	
P%	90	111.739	11.1739	4.39917323	Tamaño Max.	198.03	19.803	7.80
P%	75	84.3	8.43	3.31889764	Tamaño Min.	2.09	0.209	0.08
P%	80	93.45	9.34	3.68	Moda	50	5	1.97

Fuente. Autor de tesis.

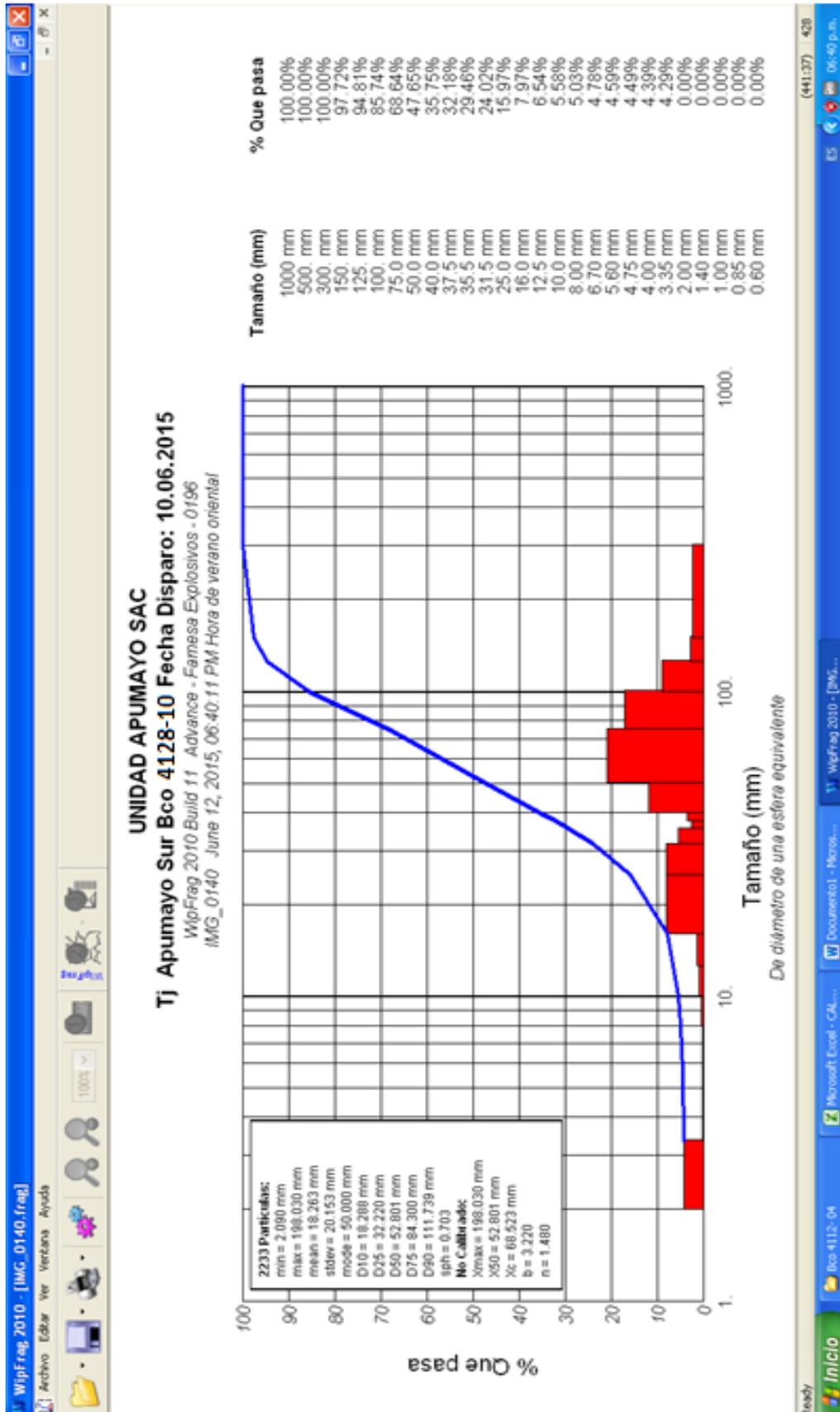


Figura 5.69. Resultados de fragmentación P80 en Wip frag 2010 prueba 2.

Fuente. Autor de tesis.

**5.2.45 Resumen de la fragmentación**

Ver Tablas 5.28, 5.29 y Figuras 5.70, 5.71.

**Tabla 5.28.** Fragmentación P80 media de prueba 1 y prueba 2.

P80 (1)								
Porcentil	mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg	
P%	90	96.814	9.6814	3.8115748	Tamaño Max.	147.123	14.7123	5.79
P%	75	70.111	7.0111	2.76027559	Tamaño Min.	2.074	0.2074	0.08
P%	<b>80</b>	<b>79.01</b>	<b>7.90</b>	<b>3.11</b>	Moda	50	5	1.97

P80 (2)								
Porcentil	mm	cm	Pulg		mm	cm	Pulg	
P%	90	111.739	11.1739	4.39917323	Tamaño Max.	198.03	19.803	7.80
P%	75	84.3	8.43	3.31889764	Tamaño Min.	2.09	0.209	0.08
P%	<b>80</b>	<b>93.45</b>	<b>9.34</b>	<b>3.68</b>	Moda	50	5	1.97

	Pulg
P80 (1)	3.11
P80 (2)	3.68
P80 Promedio	3.40

Fuente. Autor de tesis.

**Tabla 5.29.** Fragmentación con doble iniciación no electrónica, banco 4128 - Py 10 – RMR 52.

Fragmentación con doble iniciación no electrónica en Sílice granular sílice masiva y			
P 80	mm	cm	Pulgadas
PRUEBA 1	79.01	7.901	3.111
PRUEBA 2	93.45	9.345	3.679
PRUEBA 3	84.21	8.421	3.315
PRUEBA 4	82.23	8.223	3.237
PRUEBA 5	80.45	8.045	3.167
PRUEBA 6	95.33	9.533	3.753
PRUEBA 7	116.23	11.623	4.576
PRUEBA 8	97.45	9.745	3.837
PRUEBA 9	82.98	8.298	3.267
PRUEBA 10	70.21	7.021	2.764
PREUBA 11	84.36	8.436	3.321
PRUEBA 12	82.28	8.228	3.239
PRUEBA 13	75.35	7.535	2.967
PROMEDIO	87.0441667	8.643	3.403

Fuente. Autor de tesis.

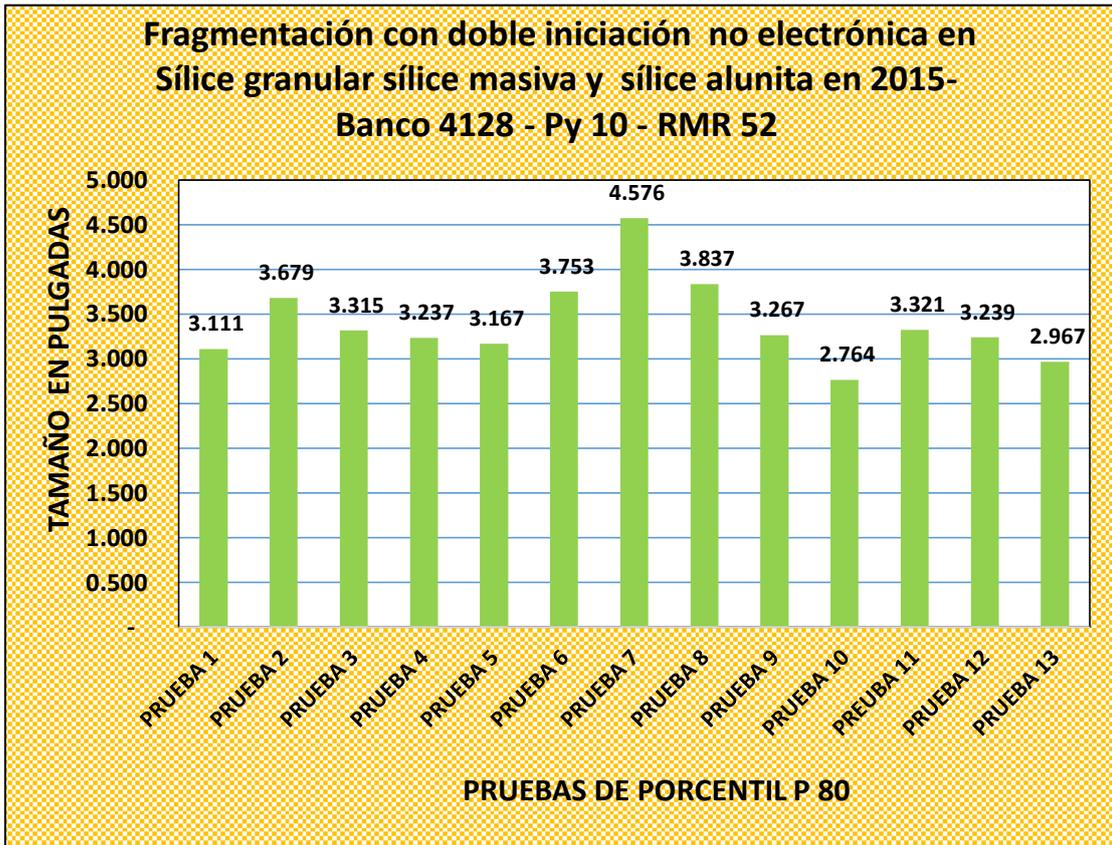


Figura 5.70. Fragmentación con doble en 2015-Banco 4128 - Py 10 - RMR 52.

Fuente. Autor de tesis.

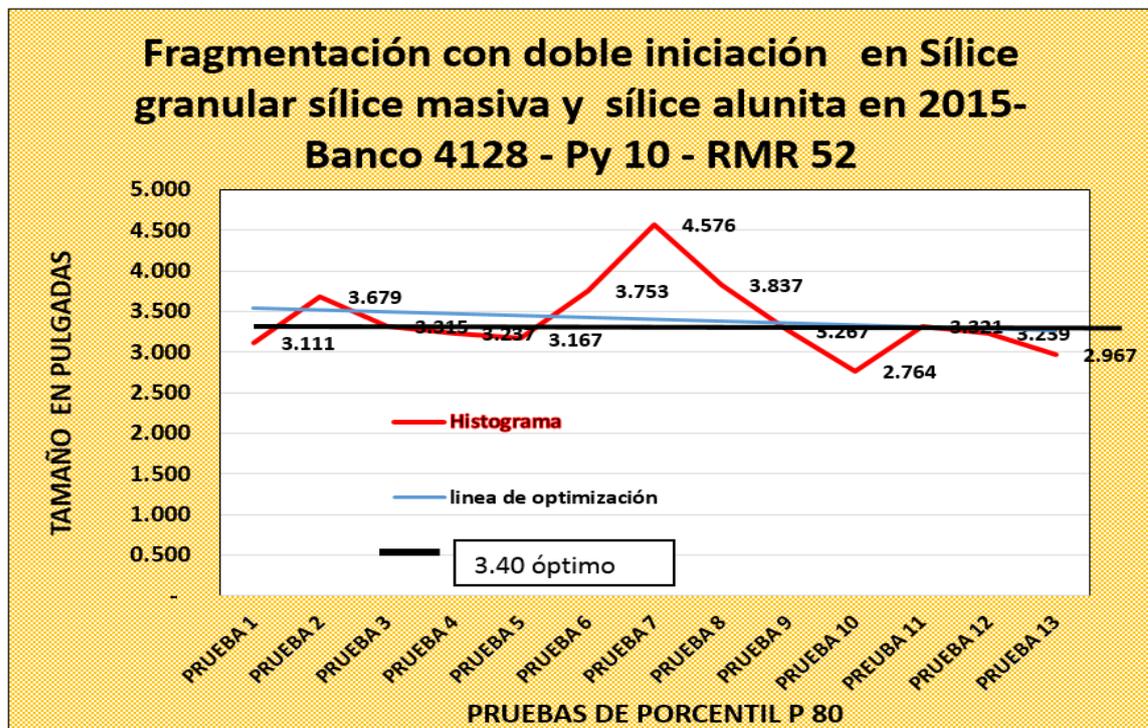


Figura 5.71. Fragmentación óptima, banco 4128 - Py 10 – RMR 52 P80 = 3.40.

Fuente. Autor de tesis.

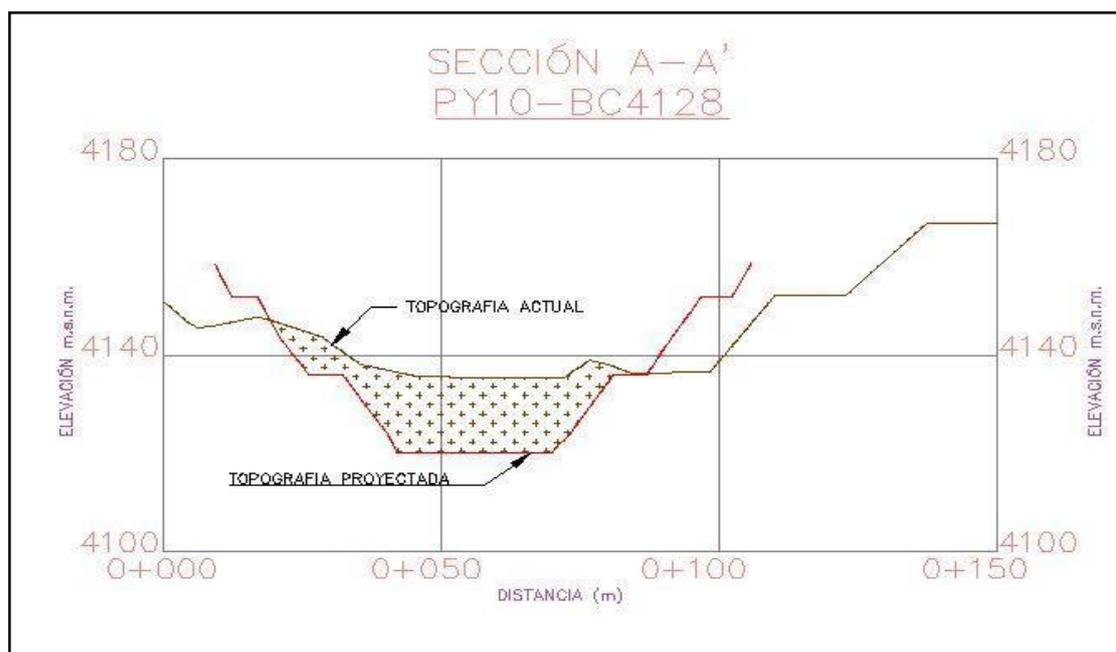
### 5.2.46 Interpretación de resultados

- El diseño actual de carga de los taladros, nos permite controlar los pisos, y se consigue una mejor distribución de energía y además menor consumo de explosivo.
- Se verificó las densidades quedando los resultados de HA-28 = 0.82 (g/m<sup>3</sup>), HA-37 = 1.05 (g/cm<sup>3</sup>) y HA-46 = 1.26 (g/cm<sup>3</sup>), quedando en los rangos permisibles.
- Se realizó el control estricto del procedimiento carguío de taladros usando medio metro de cámara de aire en el fondo del taladro, un metro de taco intermedio y tres metros de taco final.
- Cuando se identifica las cavidades, se usan las mangar de plástico con el propósito de controlar la carga en el taladro con apoyos de cámaras.
- Tener un stock de materiales (Rafia, mangas de plástico, winchas y otros.), para controlar el carguío de taladros en las zonas que presentan fallas geológicas.
- Hacer seguimiento de las alteraciones geológicas, para el diseño de mallas según el tipo de terreno.
- Hacer el seguimiento de las alturas de los taladros según la cota requerida del banco.
- En el diseño de amarre de la malla considerar la salida secuencial taladro por taladro y aprovechando el buzamiento de la estructura de la roca.
- se constató buenos resultados en el disparo (“Cero fallas”).

- Resulta necesario ser más exigentes con los programas de mantenimiento y calibración del camión-fábrica que utilizan.
- El personal debe estar capacitado para resolver estos inconvenientes, no solo basta conocer el procedimiento de cada actividad, sino además debe conocer detalles del producto como las propiedades y características propias de cada producto.
- Considerando como factores de seguridad mínimos requeridos 1.4 en condiciones estáticas y 1.0 en pseudoestáticas, se obtuvo los siguientes resultados para el proyecto 10 BC 4128; se debe tener en cuenta que la sección A-A', analizada resulta estable pero que se debe realizar una limpieza de las banquetas ya que se encuentra material suelto de anteriores deslizamientos provenientes de las crestas de los taludes superiores al proyecto.
- La fragmentación P80 óptima es de 3.405 pulgadas que ha resultado de 13 pruebas en un macizo rocoso de calidad regular RMR 52, las alteraciones de la zona han permitido que la calidad del macizo rocoso silisificado sea de valores diferentes para cada tipo de roca alterada.

#### **5.2.47 Topografía del banco 4128 proyecto 10 sección A-A'**

Respecto al monitoreo de diseño se observa en la sección siguiente como se encuentra en la topografía actual respecto a la topografía de diseño en el proyecto 10 del banco 4128. Como se puede ver en las Figuras 5.72 y 5.72a.



**Figura 5.72.** Sección A-A' de topografía del banco 4128 Py 10.

Fuente. Autor de tesis.



**Figuras 5.72a.** Resultado de la voladura en banco 4128 Py 10.

Fuente. Autor de tesis.

5.2.48 Análisis de estabilidad Tajo Apumayo banco 4128 proyecto 10 (antes de voladura) Sección A-A'

Ver Figuras 5.73 y 5.74.

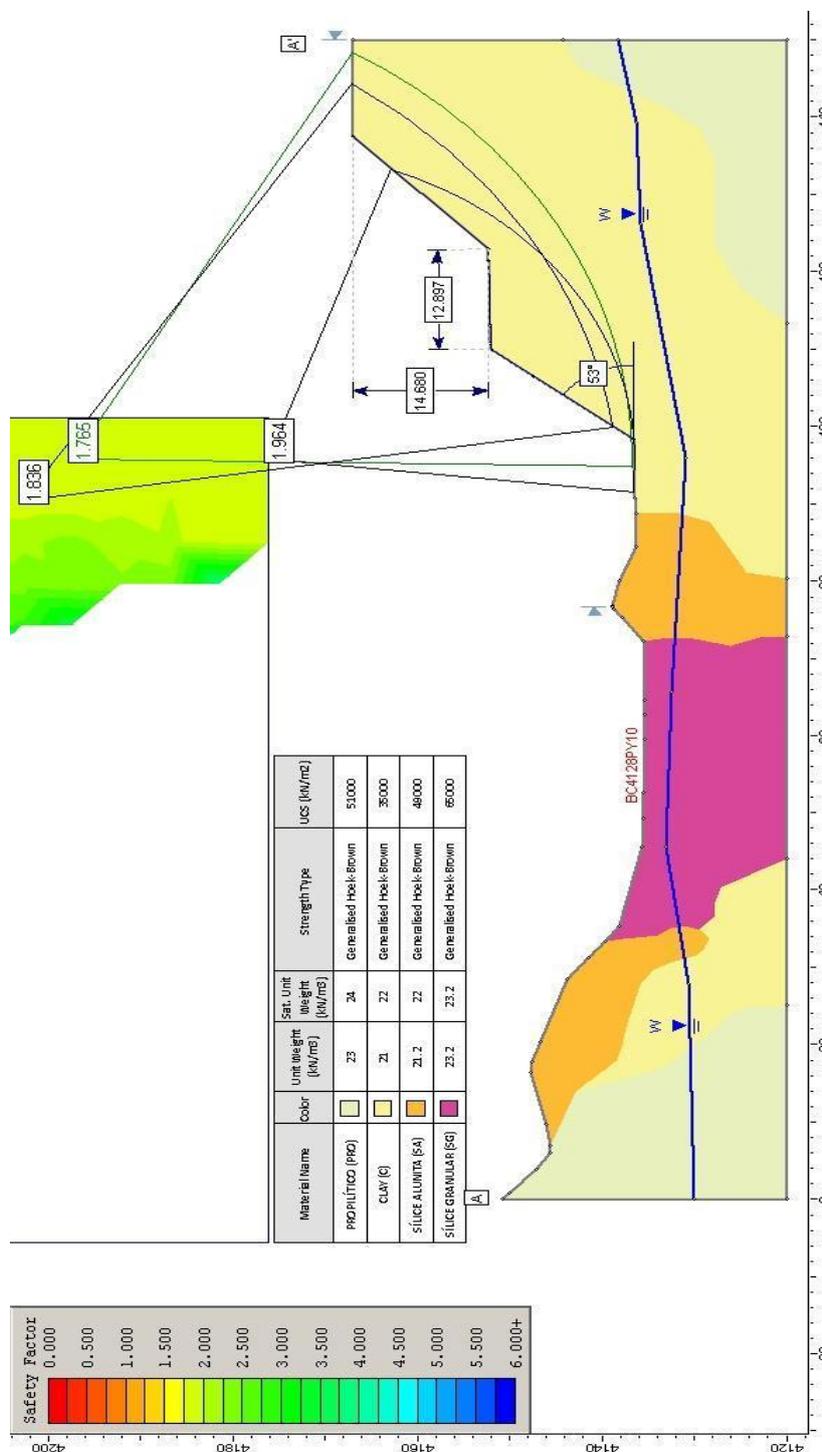


Figura 5.73. Factor de seguridad estático no drenado = 1.765.

Fuente. Autor de tesis.

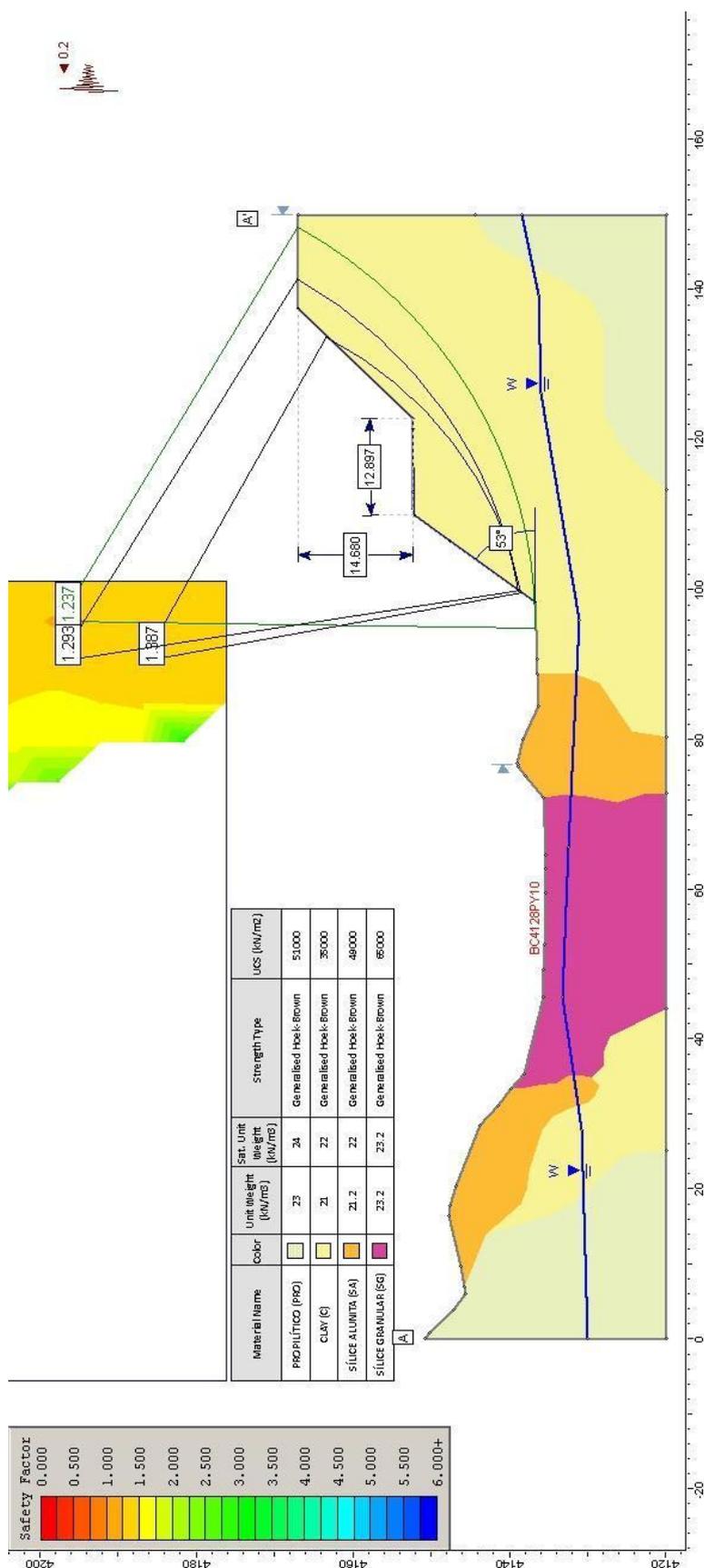


Figura 5.74. Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.237.

Fuente. Autor de tesis.

5.2.49 Banco 4128 proyecto 10 (después de voladura)

Ver Figura 5.75 y 5.76

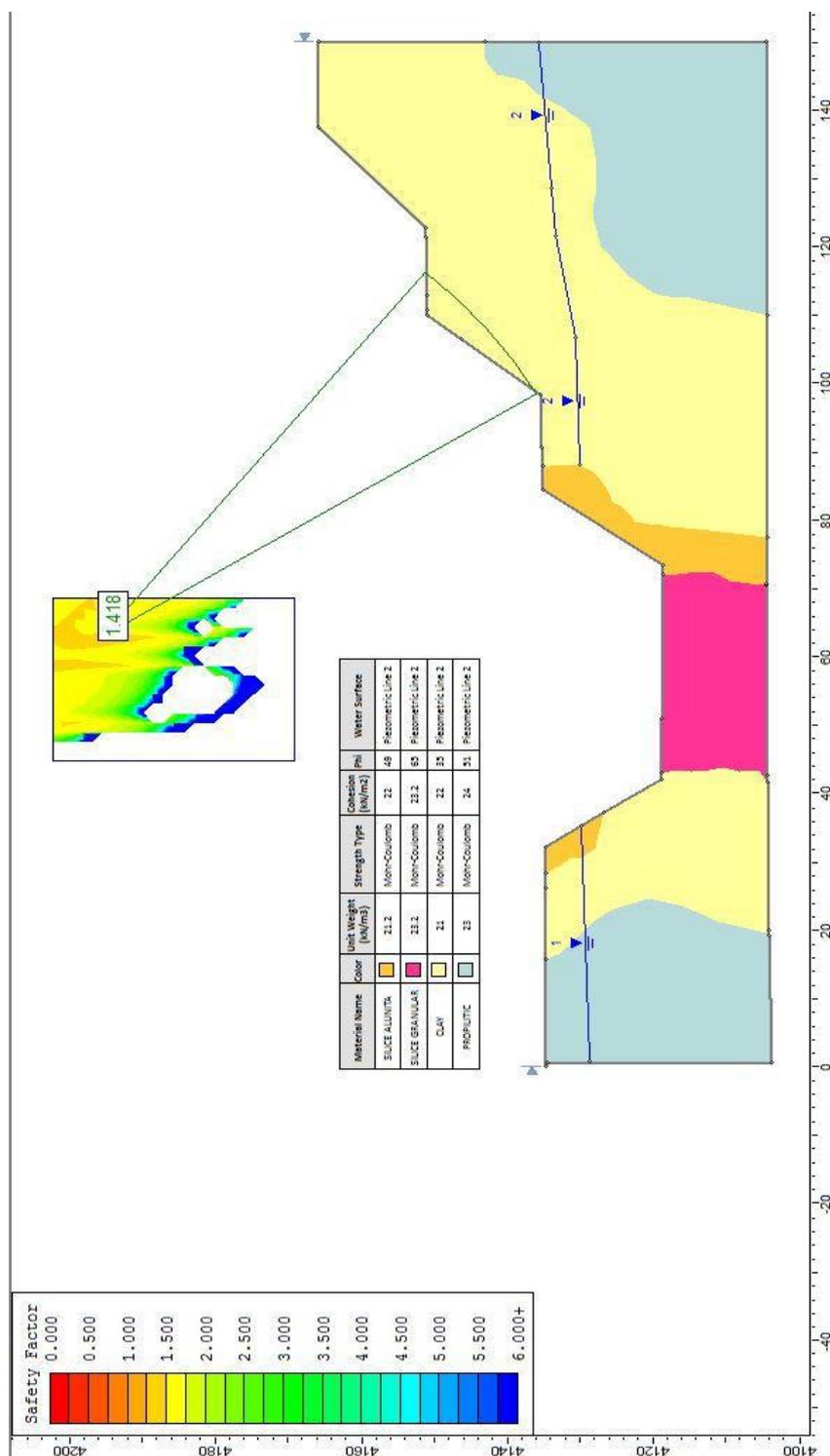
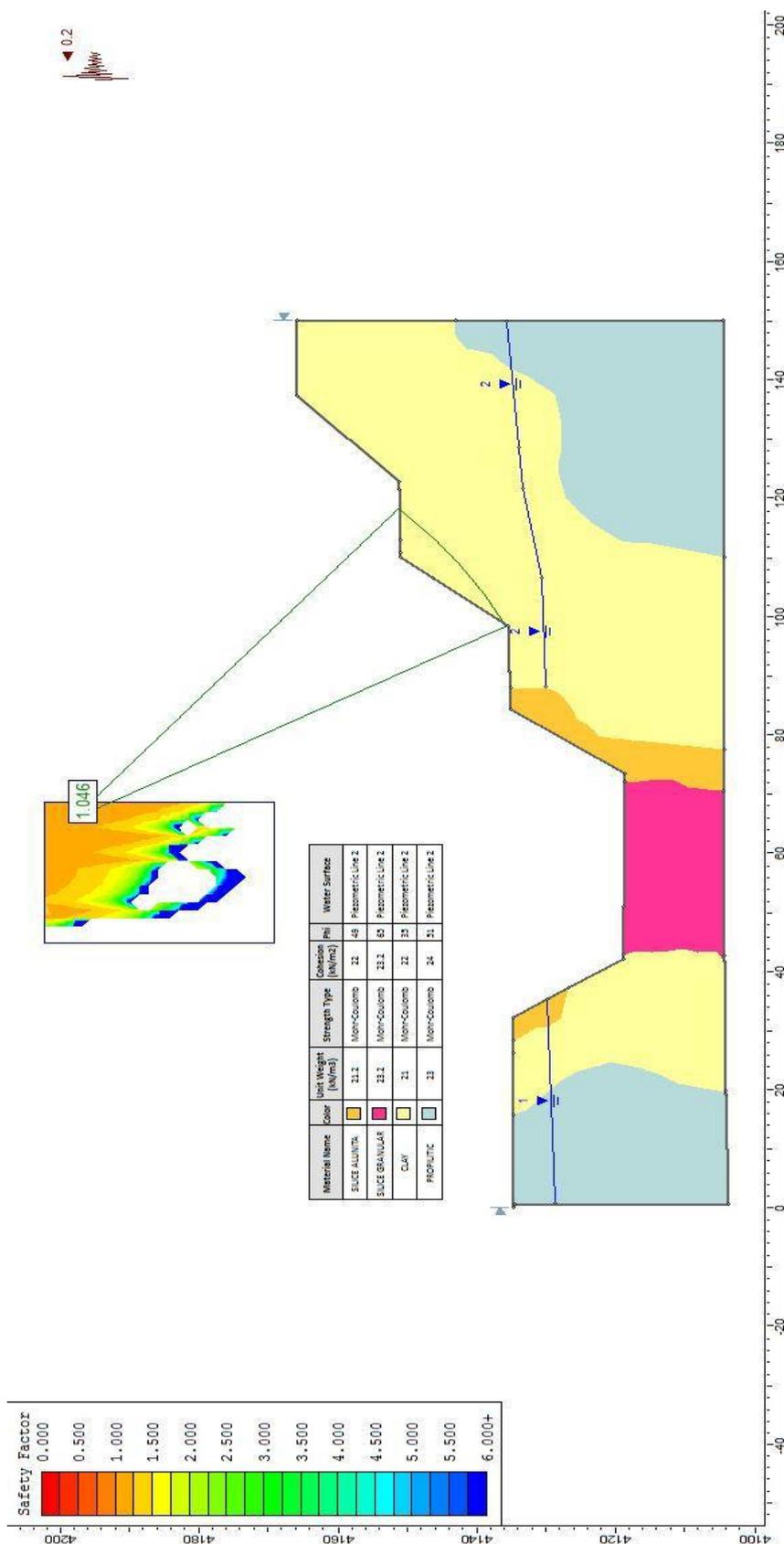


Figura 5.75. Sección A-A' factor de seguridad estático no drenado = 1.418.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.76.** Factor de seguridad estático no drenado = 1.046.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.50 Escenario N°2. Aplicación de los parámetros de optimización en producción

En la Figura 5.76a, se observa la zona de perforaciones en Tajo Apumayo Sur banco 4128 – proyecto 12 para la voladura con las respectivas mallas pre determinadas con el objetivo fundamental de lograr una fragmentación óptima de P80 3.405 en el banco de producción.



**Figura 5.76a.** Voladura Tajo Apumayo Sur banco 4128 Py 12.

Fuente. Autor de tesis.

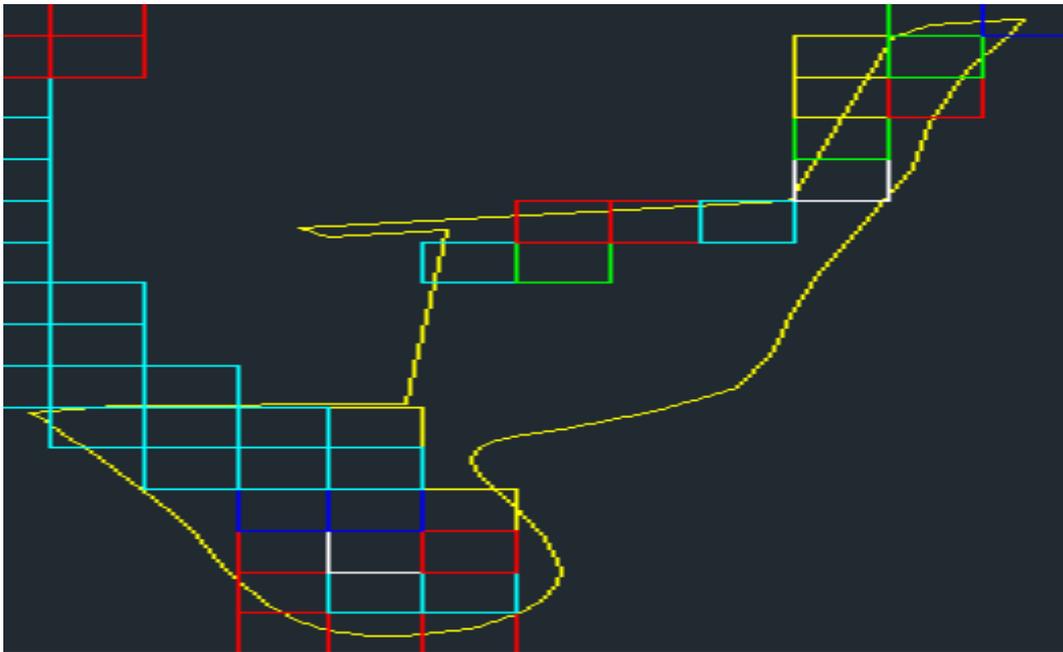
### 5.2.51 Análisis de voladura

- Planeamiento.
- Geología.
- Geotecnia, diseño y f.s.

- Marcado de malla.
- Diseño de voladura.
- Resultado de fragmentación de P80.

### 5.2.52 Planeamiento y geología del proyecto con modelo de bloques

Para modelo de bloques se ha utilizado el software Mine Sight. Ver Figura 5.77.



**Figura 5.77.** Modelo de bloques del proyecto 12.

Fuente. Autor de tesis.

5.2.53 Geología y alteraciones del proyecto. BC 4128 Py. 12

Ver Figura 5.78 y 5.79.

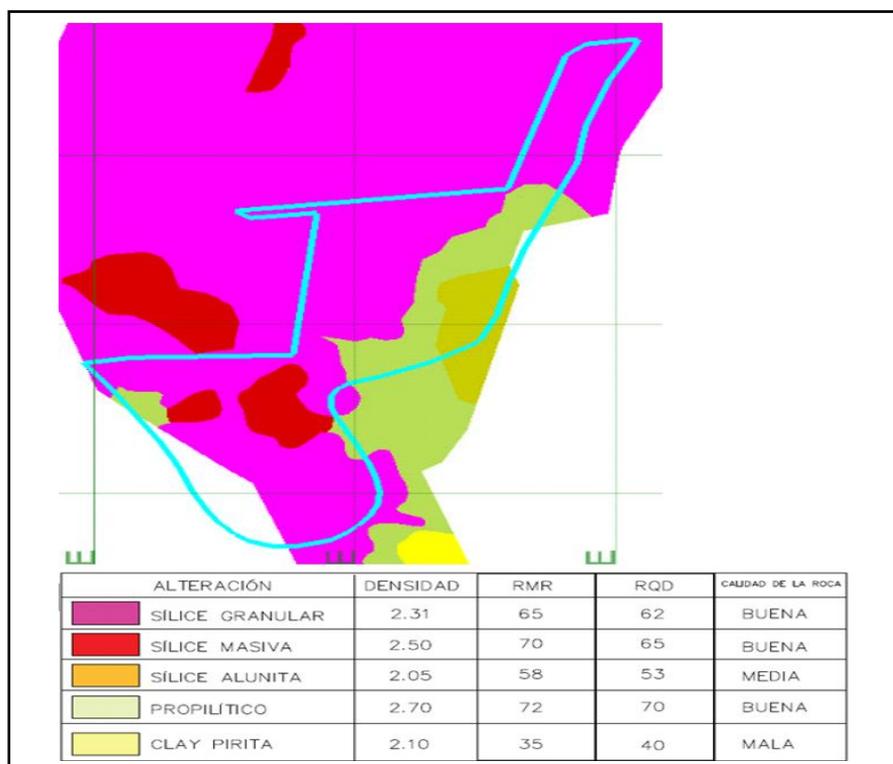


Figura 5.78. Calidad del macizo rocoso en función a RMR de Bieniawski.

Fuente. Autor de tesis.

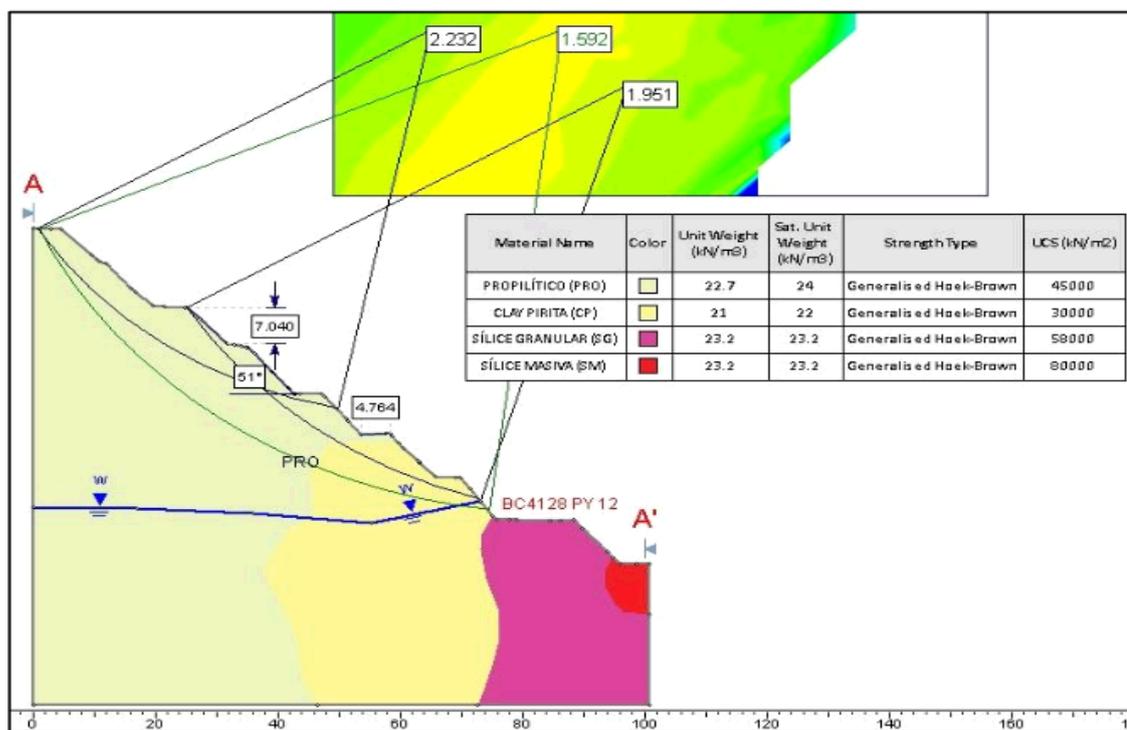


Figura 5.79. Zonificación de alteraciones en SM, SG y S.A. Proyecto 12.

Fuente. Autor de tesis.

**5.2.54 Geotecnia el factor de seguridad: Tajo Apumayo banco 4128 proyecto 12**

Considerando como factores de seguridad mínimos requeridos 1.4 en condiciones estáticas y 1.0 en pseudoestáticas, se ha obtenido los siguientes resultados para este proyecto, Se debe considerar que la estabilidad esta dad debido a que se tiene los anchos de banquetas y los ángulos de talud adecuados. Ver Figuras 5.80 hasta 5.84.



**Figura 5.80.** Sección A-A' factor de seguridad estático no drenado 1.592.

Fuente. Autor de tesis.

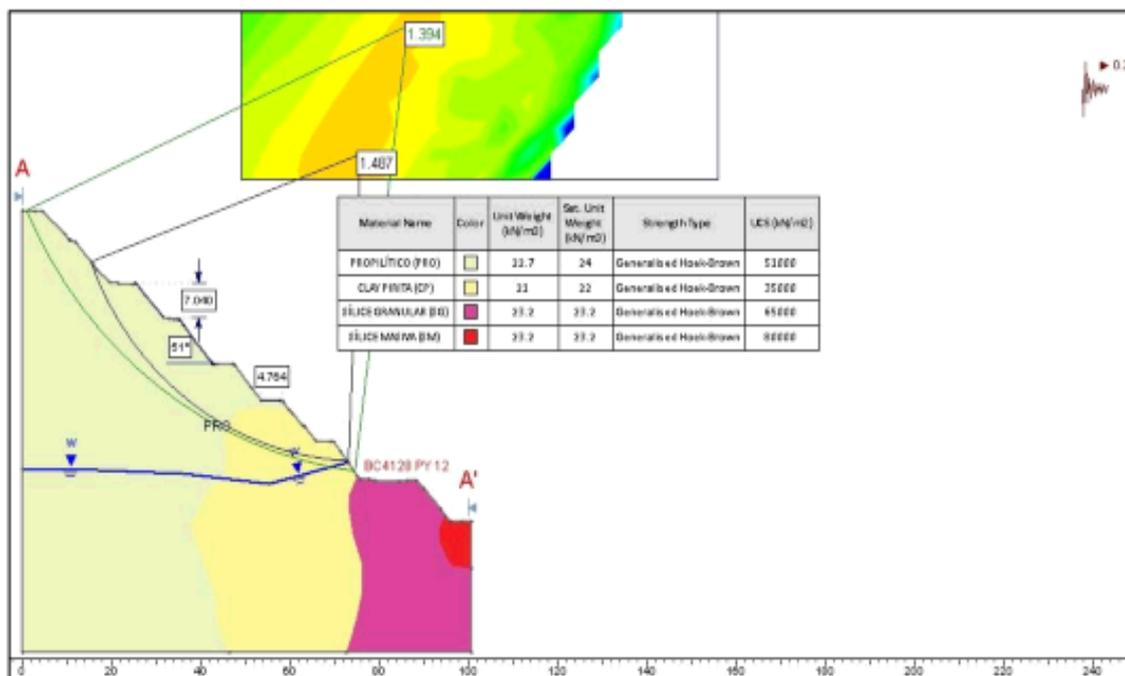


Figura 5.81. Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.394.

Fuente. Autor de tesis.

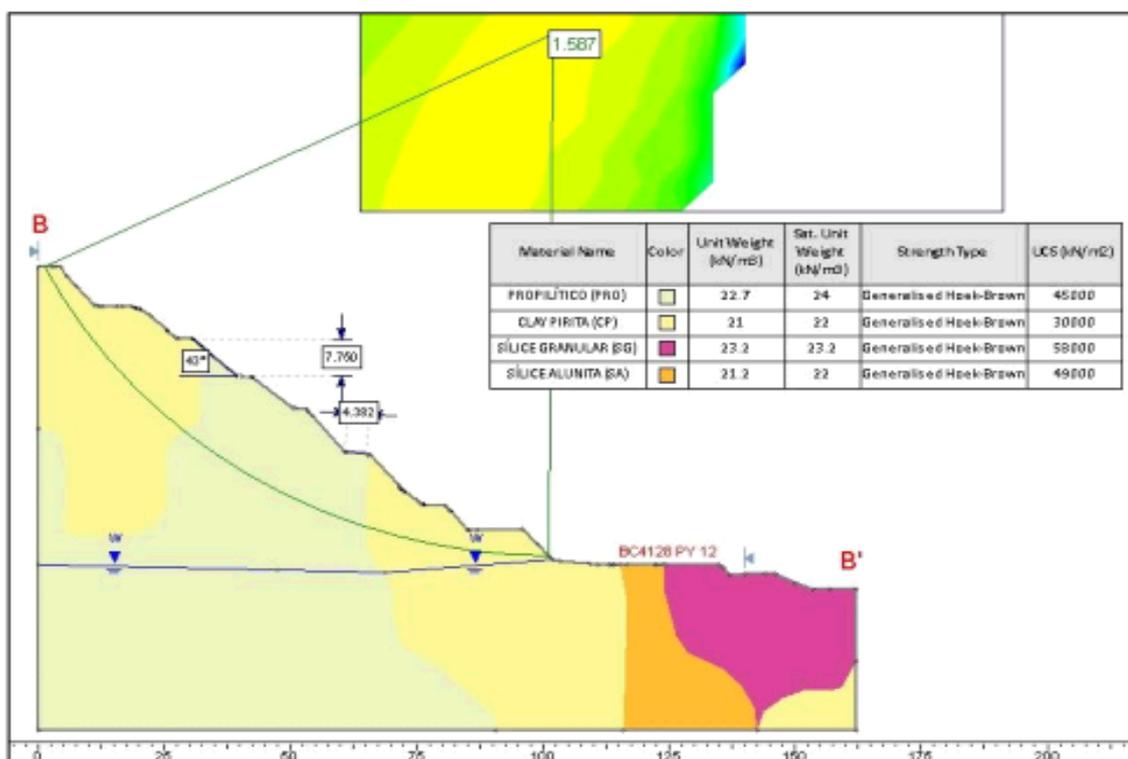


Figura 5.82. Sección B-B' factor de seguridad estático no drenado = 1.587.

Fuente. Autor de tesis.

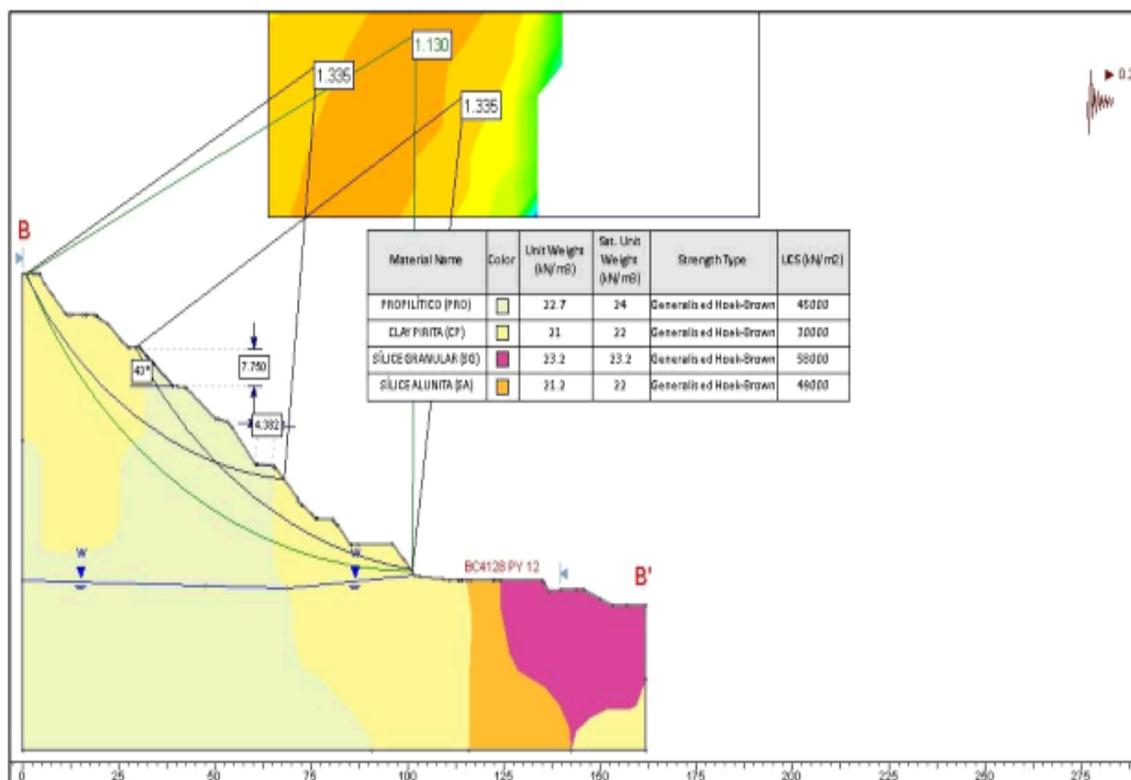


Figura 5.83. Factor de seguridad pseudoestático no drenado = 1.130.

Fuente. Autor de tesis.

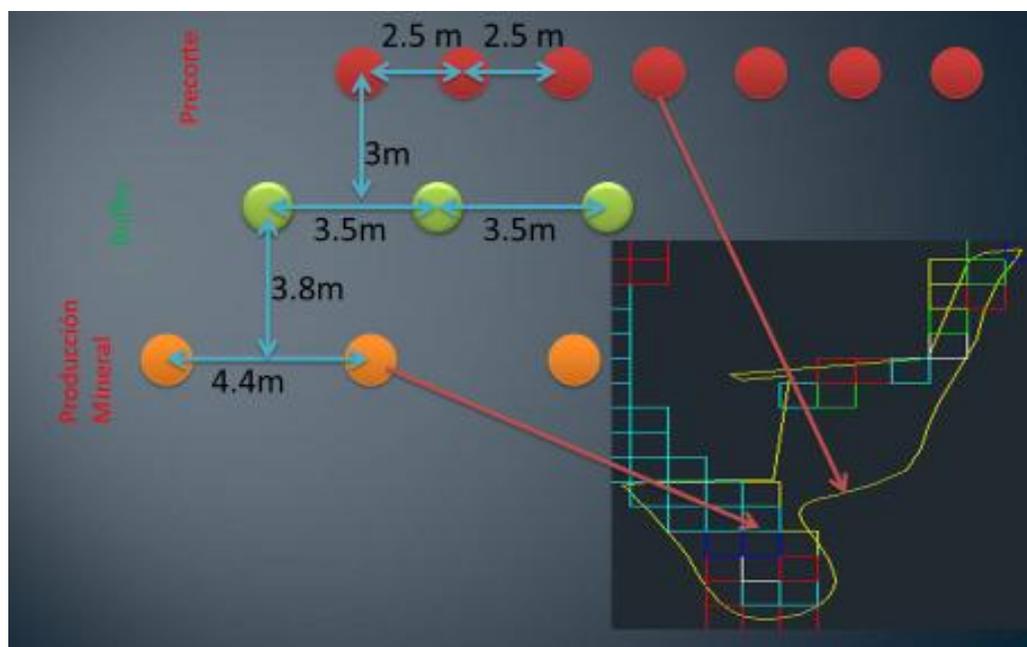
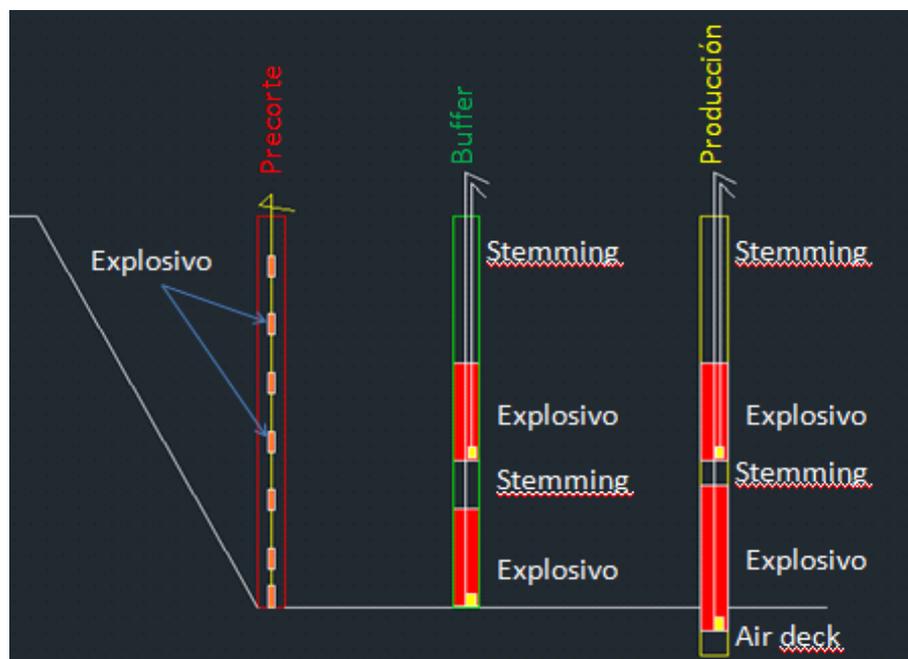


Figura 5.84. Diseño de malla de perforación.

Fuente. Autor de tesis.

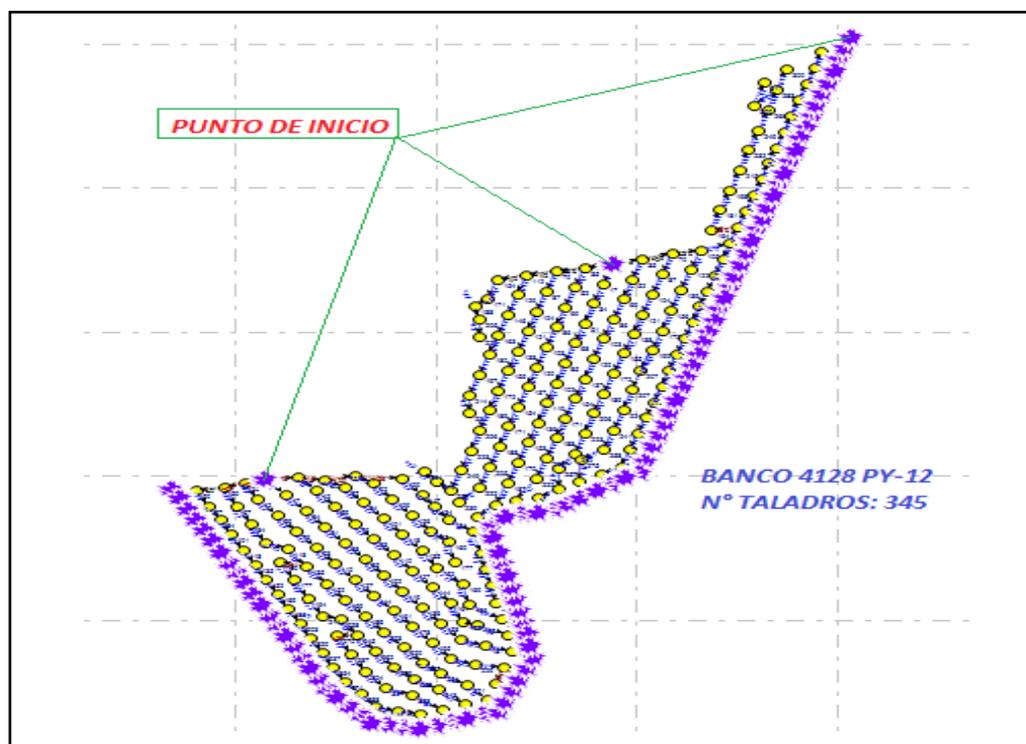
### 5.2.55 Diseño de carga en voladura

Ver Figuras 5.85 hasta 5.87a.



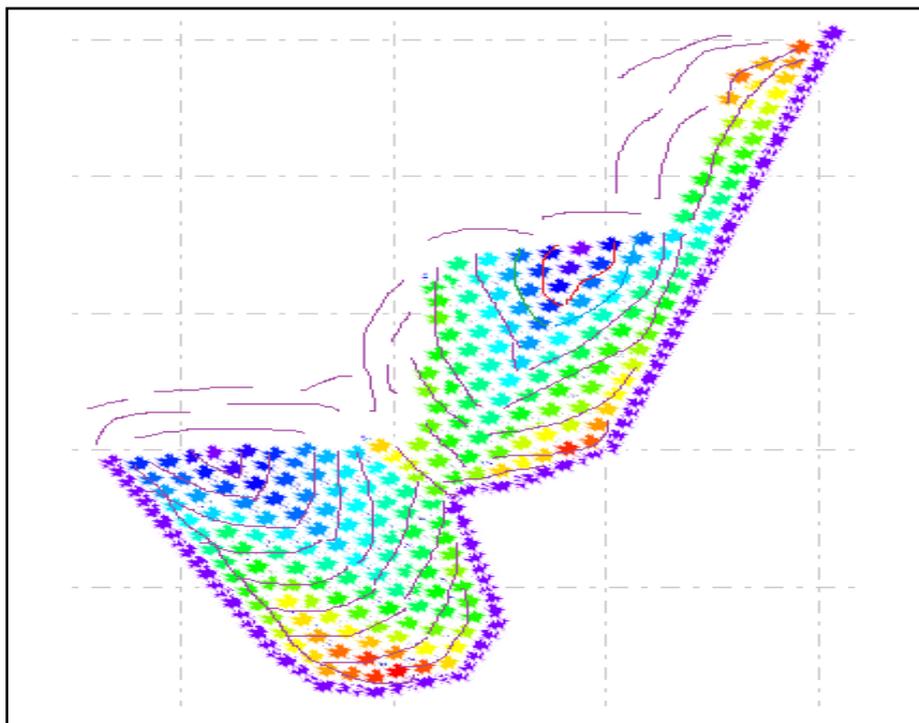
**Figura 5.85.** Diseño de carga de voladura de producción.

Fuente. Autor de tesis.



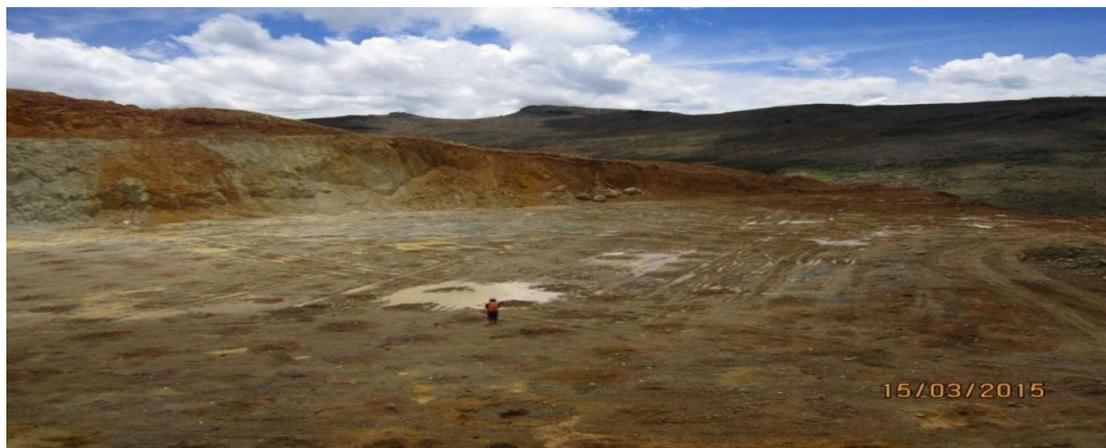
**Figura 5.86.** Distribución de taladros de voladura.

Fuente. Autor de tesis.



**Figura 5.87.** Secuencia de salida en voladura.

Fuente. Autor de tesis.

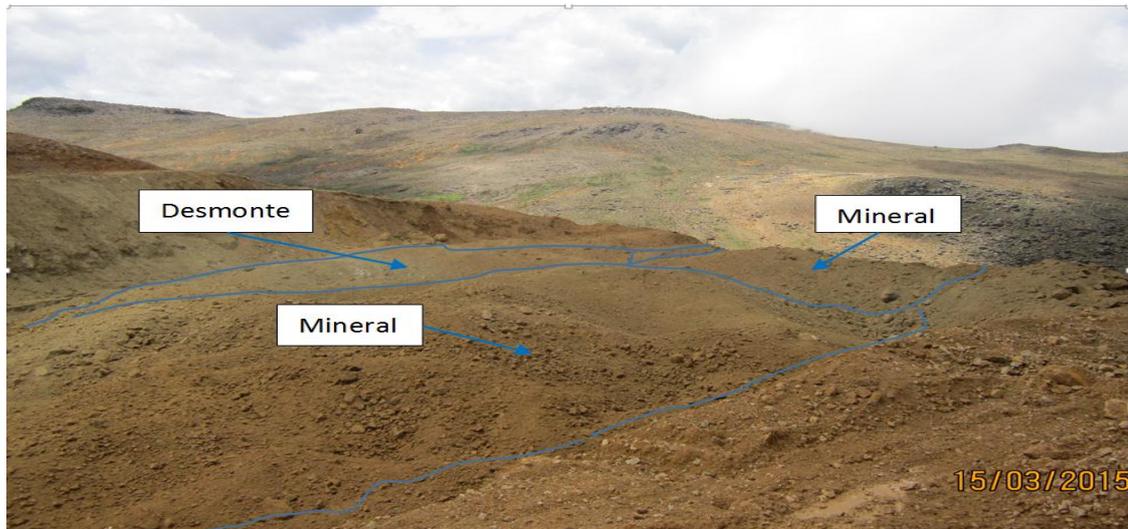


**Figura 5.87a.** Zona perforaciones antes de la voladura banco 4128 – Py 12.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.56 Resultados de voladura en producción

Los resultados de voladura con doble iniciación no electrónica se observan en las Figuras 5.87b teniendo presente la zona de voladura con las perforaciones respectivas en Figura 5.87a, los resultados obtenidos son evaluados con *Wip frag* 2010 para mineral y desmonte.



**Figura 5.87b.** Resultados de la voladura doble iniciación no electrónica en producción.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.57 Fragmentación en producción

Ver Figura 5.87c., 5.88, 5.89 y Tabla 5.30.



**Figura 5.87c.** Resultado de Fragmentación con Wip frag 2010 en producción.

Fuente. Autor de tesis.

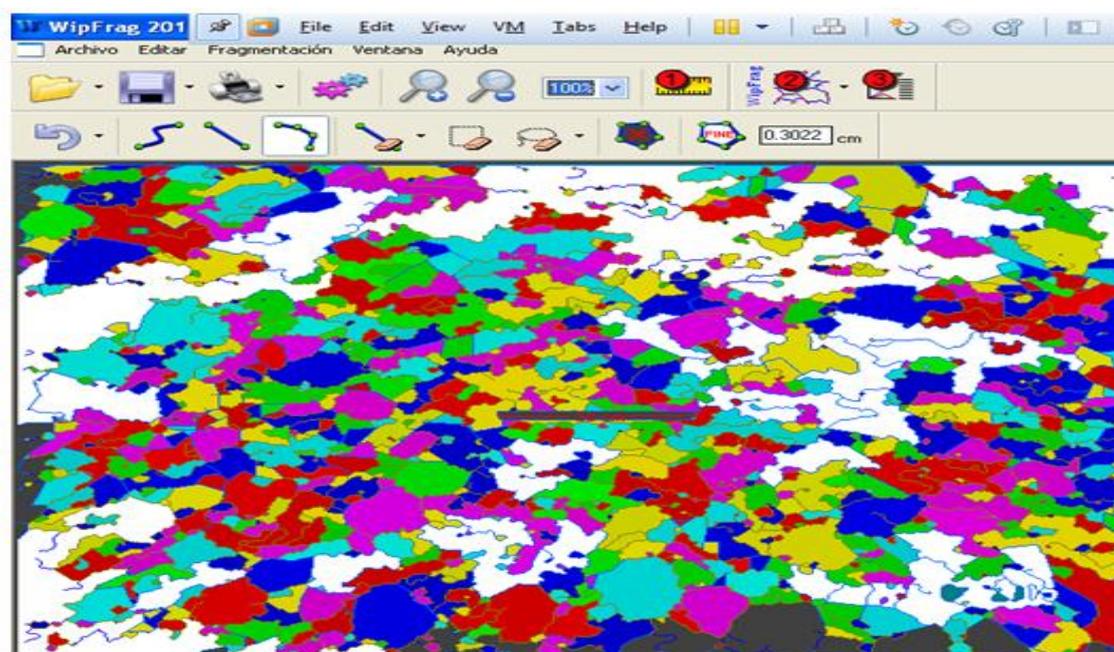


Figura 5.88. Imagen de fragmentación P80 con Wip frag 2010 en producción.

Fuente. Autor de tesis.

Tabla 5.30. Cálculo de P80 con Wip frag 2010 en producción.

CALCULO P80				
	Porcentil	mm	cm	Pulg
P%	90	115.527	11.5527	4.54830709
P%	75	83.099	8.3099	3.27161417
P%	<b>80</b>	<b>93.91</b>	<b>9.39</b>	<b>3.70</b>

Fuente. Autor de tesis.

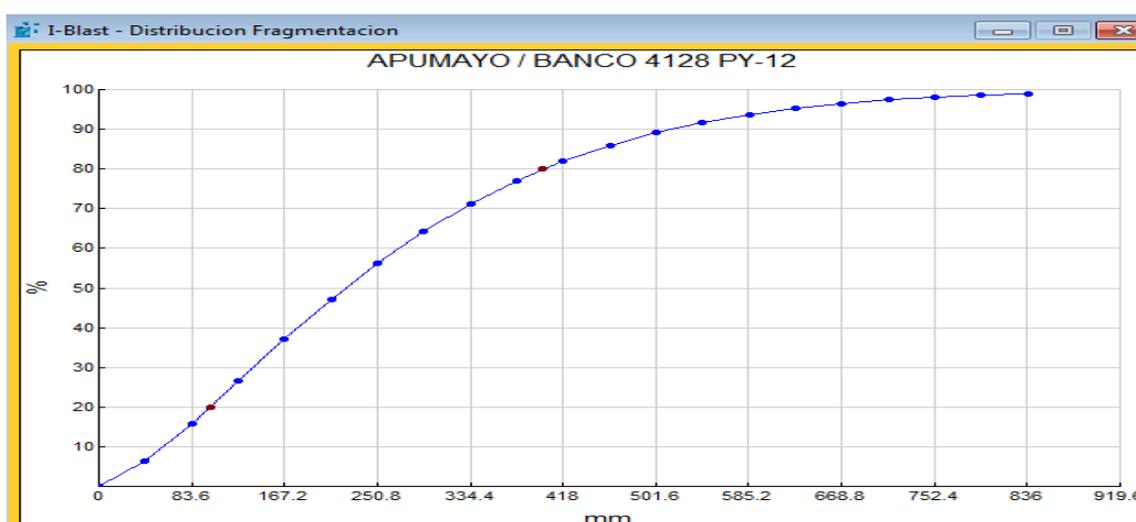


Figura 5.89. Distribución de fragmentación mediante I- Blast.

Fuente. Autor de tesis.

### 5.2.58 Interpretaciones

- Se finalizó con el protocolo, de la voladura del banco 4128 proyecto12, cumpliendo con todo el protocolo de perforación y voladura para lograr una fragmentación de P80 satisfactorio.
- Se logrado una fragmentación de P80 de 3.70 pulgadas este valor está por encima de P80 optima de 3.405 pulgadas.
- Los resultados obtenidos indican que es necesario hacer reajustes de acuerdo a la calidad del macizo rocoso con mayor precisión en la zona de rocas alteradas silisificadas principalmente en la zona de contactos en donde el RMR es variado en muchos casos se ha encontrado un RMR mayor que 52, enmarcados en una calidad buena de acuerdo a la propuesta de *Bieniawski* 1989.
- Se considera necesario el seguimiento en el proceso de perforación y voladura respecto a las dimensiones establecidas en ña malla de perforación para precorte, buffer y producción, además la columna de carga explosiva de acuerdo a cada calidad del macizo rocoso, estos resultados deben ser evaluados con *Software Wip frag* 2010 con varias iteraciones.
- La toma de imágenes con *Wip frag* se considera muy importantes para lograr alcanzar una fragmentación representativa, estas tomas deben ser en zonas más variadas en fragmentación los cuales se pueden diferencias macroscópicamente, cuyos resultados de la evaluación con *Wip frag* sean muy cercanos a la fragmentación P80 óptima de ser necesarios sean inferiores a 3.405 pulgadas.

- En las andesitas silisificadas conforme su calidad para mejores resultados se sugiere el uso de famecortes en los pre cortes para que se logre acercarse al tamaño de fragmentación óptima.
- En rocas alteradas en la actualidad se utiliza artesanalmente los famecortes de tipo salchicha.

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN Y APLICACIÓN

#### 6.1 DISCUSIONES

Según Hinostroza (2014), en tesis “Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto” de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, los estudios e investigaciones para poder demostrar la importancia y necesidad de colocar un iniciador con detonador electrónico más y así poder lograr optimizar la fragmentación de la roca en zona de mineral; posteriormente se realizó varias pruebas de voladura con doble iniciación electrónica, a la vez se ha modificado algunos parámetros ya establecido como el diseño de malla, el diseño de carga, y los tiempos de secuencia de salida del disparo, realizando una mejora, para lograr nuestro objetivo principal que es optimizar la fragmentación en zona de mineral usando la doble iniciación electrónica. En la Mina Toquepala de *Southern Copper*. En las pruebas de voladura con doble iniciación electrónica se obtuvo una reducción hasta un 36 % en el P80 según los análisis realizados, además de obtener una reducción en tiempo de carguío de la pala hasta un 31 %.

Según las investigaciones de Hinostroza (2014), realizado en la Mina Toquepala de *Southern Copper* en la explotación cobre y molibdeno donde los resultados obtenidos con la doble iniciación electrónica se he generado un incremento de costos debido al incremento en accesorios, de mezcla explosiva, de cantidad de taladros pero a cambio se recibe una mejor fragmentación de las rocas en la zona de mineral, cuyos beneficios se aprecian en todo su alcance en el chancado y molienda. En resumen obtenemos un incremento en la producción en mineral diaria para el chancado de la planta en un 21%, además de reducir el *work index* (kw-h/TM) en un 6%, demostrando así, que aplicando la doble iniciación electrónica, se obtiene buenos resultados en la fragmentación de la roca y por lo tanto conseguimos ser más eficientes y eficaces en el proceso minero metalúrgico.

## **6.2 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN PARA PRODUCCIÓN EN MINA TOQUEPALA DE *Southern Copper***

**Perforación para producción.** Se han considerado los siguientes:

- Diámetro de perforación: 11 Pulgadas.
- Malla de perforación: Patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12 m.
- Longitud de perforación: 15 m.
- Sobre perforación: de 1.5 a 2.0 m.

**Perforación para pre corte.-** Los parámetros de perforación, están diseñados en función a las características geomecánicas y estructurales de los macizos rocosos:

- Diámetro de perforación: 5.0 pulgadas.
- Espaciamiento de taladros: de 1.5 m a 2.0 m.

- Longitud de perforación: 16 m.
- Inclinación: de 65° a 80°.

En la fase 3, como línea base se obtiene los resultados de los análisis de fragmentación en las voladuras en zona de mineral, el proyecto de disparo (2920-126-127130), donde se tuvo un P80 de 27.38 cm (10.76 pulgadas). Siendo el tamaño de fragmentación P80 mayor en Mina Toquepala de *Southern Copper* al P80 3.9 pulgadas en la Unidad Minera Apumayo SAC. También con las mismas fotos del proyecto de línea base, se realizaron otras pruebas en otros software de voladura, para validar el P 80 del proyecto, en Mina Toquepala de *Southern Copper* se utilizó el *Power Sieve*, se ha realizado análisis de 49 fotos tomadas en las zonas marcadas con rojo en donde la pala ha estado avanzando, las cuales fueron analizadas con el Software *Power Sieve* dando como resultado un P80 = 17.5 cm. Estas fotos fueron tomadas en Nv. 2905 de los proyectos 095-096.

### 6.3 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZADOS EN LA VOLADURA TAJO APUMAYO SUR

**Perforación.** En el presente trabajo de investigación los parámetros de perforación, están diseñados en función a la calidad del macizo rocoso de tipo andesita silisificada y aliterada y con rasgos estructurales de los macizos rocosos muy evidenciadas. En la perforación se utiliza dos perforadoras DM45E, con martillo de fondo y el diámetro de perforación es de 6 3/4" y la altura de perforación es de Nueve metros, el cual incluye 1 m de sobre perforación para obtener un piso uniforme. La penetración de la broca en la roca se logra por parámetros de presión de empuje y velocidad de rotación; el barrido del detritus se realiza mediante aire comprimido.

La malla empleada depende de la densidad de la roca, densidad del explosivo y la formación del macizo rocoso, la calidad del macizo rocoso ha sido determinado mediante la propuesta de Bieniawski 1989 para un RMR que varía de 35 a 70 en una roca andesita muy alterada y silisificada. Las mallas a utilizar están en función a parámetros técnicos las cuales son:

- Malla para precorte N°1 2.5 x 3.00m. - Roca in situ (media suave y duro).
- Malla triangular N° 2: 3.80 x 4.40 m. – Roca in situ (media suave).
- Malla triangular N° 2: 3.70 x 4.20 m. – Roca in situ (dura).

El diseño de la malla de perforación es un factor sumamente importante puesto que cualquier buen resultado de la voladura es mérito de una buena malla (Burden y espaciamiento) y su adecuada perforación (perforar en el punto) además mucho depende de una correcta limpieza de las áreas a perforar y señalización. En la comparación realizada respecto a los parámetros de perforación y voladura, en Unidad Minera Apumayo SAC. Las dimensiones de la malla de perforación es menor respecto a la Mina Toquepala de *Southern Copper* para producción, *Buffer* y precorte, los resultados de fragmentación de P80 de 3.9 pulgadas han sido evaluados con *software Wip frag 2010*.

#### **6.4 APLICACIONES**

En la actualidad el tamaño de la fragmentación resultado de la perforación y voladura en minería superficial es muy importante para lograr mejores resultados económicos en ganancias porque el tamaño de la fragmentación repercute directamente en la velocidad de carguío y transporte de minerales, en los pórfidos de cobre y en los yacimientos diseminados de oro las operaciones mineras se realizan a mayor escala, El monitoreo de

la operación se realiza día a día a través de un sistema de control de producción y performance de equipos (velocidad de perforación, fragmentación de rocas por voladura, velocidad de carguío, ciclos de acarreo, TM/h; TM/ciclo; disponibilidad y utilización de equipos, las principales variables medidas para las perforadoras son: Productividad, disponibilidad mecánica, utilización, factor de uso, vida útil de accesorios de perforación, considerando estas particularidades los resultados obtenidos constituyen un aporte importante respecto al tamaño de fragmentación P80 y es aplicable en la operaciones mineras a cielo abierto.

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** Se ha determinado las características geomecánicas de la masa rocosa en tajo Apumayo Sur proceso productivo banco 4112 Proyecto 05, los resultados han sido obtenidas de evaluación de las discontinuidades en una progresiva de 23 m consolidados en un registro lineal, el tipo de roca es una andesita alterada, el RQD es 92%, la roca alterada es sílice alunita, clay, propilítico, sílice granular y sílice masiva, la resistencia compresiva uniaxial es 23 MPa, según Bieniawski 1989 el RMR básico es 52, mediante la evaluación de parámetros, la andesita alterada es de categoría III, calidad regular-media.

**SEGUNDA:** Para optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con apoyo del *software Wip frag* 2010 en tajo Apumayo Sur, se ha realizado un total de 8 pruebas P80 en 2014 con iniciación simple no electrónica, el resultado de P80 es de 7.9387 pulgadas, para lograr una optimización de P80, se planteó el escenario 1, se refiere al tamaño de fragmentación con iniciación no electrónica con aplicación de *software Wip frag* 2010 en proceso productivo banco 4112 Proyecto 05, los resultados de factor de seguridad estático y pseudo estático de 1.00 indican estables, se ha realizado 3 pruebas de determinación de la fragmentación P80 con *Wip frag* 2010, el P80 en prueba 1 es 4.03 pulgadas, prueba 2 es 3.58 pulgadas, en prueba 3 es 5.38 pulgadas, en la optimización de fragmentación de roca mediante los parámetros de perforación y voladura en 13 pruebas el promedio de estas es P80 de 3.405 pulgadas como tamaño óptimo de fragmentación en RMR de 52.

**TERCERA:** Logrado el tamaño óptimo de fragmentación de P80 DE 3.403 se planeta el escenario 2 la aplicación de los parámetros de optimización en producción en banco 4128 - Py 12 para alcanzar a resultados óptimos, considerando las calidad del macizo rocoso y los parámetros de perforación y voladura, el factor de seguridad tanto estático y pseudo estático antes y después de la voladura son por encima de 1.00 indica que son estables, el P80 con la aplicación de *software Wip frag 2010* es 3.70 pulgadas, los resultados indican que no se ha logrado alcanzar al valor de P80 óptimo de 3.405, sin embargo se puede consideran que existe una gran reducción de tamaño de fragmentación respecto al tamaño de fragmentación P80 con *Wip frag 2010*, en el escenario 1 el P80 es 4.03 pulgadas, 3.58 pulgadas, 5.38 pulgadas, respectivamente.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Por las características de la roca alterada es sílice alunita, clay, propilítico, sílice granular y sílice masiva, cuyos valores de la resistencia compresiva uniaxial varía de acuerdo a a la calidad dela masa rocosa, se recomienda la evaluación geoemcánica más detallada en progresivas más representativas y de acuerdo a la zona de mineralización y zona de estériles mediante otros métodos de mapeos geomecánicos de celdas o ventanas para determinar con mayor precisión la calidad del macizo rocoso en la zona de banco de producción.

**SEGUNDA:** En el proceso de optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con *software Wip Frag 2010* en tajo Apumayo Sur la aplicación de *software Wip frag 2010* en proceso productivo banco 4112 Proyecto 05, la toma de imágenes es de suma importancia para la interpretación mediante el *software Wip farg 2010*, se recomienda que estos imágenes deben ser tomada en zonas representativas en donde se observe fragmentaciones variada, como resultado de la optimización el P80 sea el óptimo para el proceso de carguío y transporte tanto de minerales y estériles.

**TERCERA:** En el proceso productivo el P80 con la aplicación de *software Wip frag 2010* es 3.70 pulgadas, los resultados indican que no se ha logrado alcanzar al valor de P80 óptimo de 3.405. De acuerdo a la calidad del macizo rocoso de andesita muy alterada requiere evaluar los contactos y el comportamiento de discontinuidades, se recomienda realizar el mapeo geomecánico por iteración la reducción apropiada en malla de producción, buffer y precorte para alcanzar al valor óptimo de P80 3.405.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Aguilera & Campos, (2008). *Fragmentación: Distribución de tamaños o distribución de distribuciones*, VIII ASIEX. Pucón, Chile.
- Aler & du Mouza, (1996). *Measuring fragmentation efficiency of mine blasts*, FRAGBLAST 5. Montreal, Canada.
- Bergmann, (1983). *Effect of explosive properties, rock type and delays on fragmentation in large model blasts*, 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden.
- Davila & Quiroz, (2010). *Influencia de la Voladura en el Throughput del Molino*. Simposium Perforación y Voladura de Rocas - Huaraz.
- EXSA, *Manual Práctico de Voladura*. 4ta Edición.
- Guzmán V.R., (2010). *Tronadura 2* Escuela de Ingeniería-Centro de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile-Santiago de Chile.
- Hinostroza S. J. (2014) en tesis “*Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto*” de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- INGEMMET, Boletín 55, (1995). *Geología del Perú*: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima.
- Instituto Tecnológico Geominero de España, (1994). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. España
- ISEE, (1998). *Blaster's Handbook*. 17th Edition.

Katsabanis & Liu, (1996). *Delay requirements for fragmentation optimization*, FRAGBLAST 5. Montreal, Canada.

McKenzie, (1994). *Estado del arte de la Tronadura*. ENAEX, Gerencia Técnica.

McKenzie, (2008). *Excelencia en Voladura – Limitaciones Actuales*. VII Jornada de Tronadura, ASIEX 2008. Puerto Varas – Chile.

Mendoza & Zúñiga, (2010). Memo IM-I-M-156 *Cookbook de Perforación y Voladura – primer trimestre 2010*. Doc. Interno Minera Yanacocha SRL.

Nielsen & Kristiansen, (1996). *Blasting-Crushing-Grinding Optimisation of an Integrated Comminution System*. FRAGBLAST 5, Montreal, Canada.

#### WEB GRAFÍA

[http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos\\_pub/descarga.phtml?id\\_curso\\_ic=1781&id\\_archivo=62960](http://intrawww.ing.puc.cl/siding/public/ingcursos/cursos_pub/descarga.phtml?id_curso_ic=1781&id_archivo=62960)

[http://www.mineriacatamarca.gob.ar/LinkEducativo/InformacionAcademica/Lopez\\_Gimeno/16\\_Mecanismos\\_de\\_rotura\\_de\\_la\\_roca.pdf](http://www.mineriacatamarca.gob.ar/LinkEducativo/InformacionAcademica/Lopez_Gimeno/16_Mecanismos_de_rotura_de_la_roca.pdf)

[http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1273/1/medina\\_cr.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1273/1/medina_cr.pdf)

[http://ingenieroenminas.com/manual-de-perforacion-y-voladura-de-rocas/.](http://ingenieroenminas.com/manual-de-perforacion-y-voladura-de-rocas/)

[http://www.udc.es/files/iux/almacen/articulos/cd03\\_art21.pdf](http://www.udc.es/files/iux/almacen/articulos/cd03_art21.pdf).

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6367/15/6.METODOS%20DE%20DISE%20C3%91O%20DE%20VOLADURA.pdf>

## **ANEXOS**

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Metodología
<p><b>Problema general.</b></p> <p>¿Cómo se puede optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con apoyo del <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.</p> <p><b>Problemas específicos.</b></p> <p>¿Cómo se puede determinar las características geomecánicas de masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.</p> <p>¿Cómo se puede optimizar la fragmentación de roca mediante doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC. ?.</p>	<p><b>Objetivo general.</b></p> <p>Optimizar la fragmentación de roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con apoyo del <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p><b>Objetivos específicos.</b></p> <p>Determinar las características geomecánicas de la masa rocosa en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p>Optimizar la fragmentación de roca mediante la doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos con <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC.</p>	<p><b>Hipótesis general.</b></p> <p>Las características geomecánicas de la masa rocosa y la doble iniciación no electrónica nos permitirán optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con con apoyo <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p><b>Hipótesis específico.</b></p> <p>Las características geomecánicas de la masa rocosa nos permitirá optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p>La doble iniciación no electrónica nos permitirá optimizar la fragmentación de roca en perforación y voladura de bancos con apoyo del <i>software Wip frag 2010</i> en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p><b>Variable independiente</b></p> <p>Características geomecánicas de masa rocosa y doble iniciación no electrónica en perforación y voladura en bancos en Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p><b>Variable dependiente.</b></p> <p>Optimización de fragmentación de roca en perforación y voladura con <i>software Wip frag 2010</i> en la Unidad Minera Apumayo SAC.</p> <p><b>Variable interviniente.</b></p> <p>Tajo Apumayo Sur de la Unidad Minera Apumayo S.A.C.</p>	<p><b>1.Tipo de investigación:</b></p> <p>Aplicada y Descriptiva</p> <p><b>2.Nivel de investigación:</b></p> <p>Descriptivo y explicativo</p> <p><b>3.Metodología de investigación:</b></p> <p>Descriptiva</p> <p><b>4.Población:</b></p> <p>Características lito estructurales del macizo rocoso en una progresiva</p> <p>Valores de perforación y voladura y tamaño de fragmentación P80</p> <p><b>5.Muestra:</b></p> <p>El tamaño de la muestra se calcula con la fórmula:</p> $n = \frac{(Z^2 c)(P)(Q)}{D^2}$ <p><b>6. Etapas de análisis de datos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilación de información de campo</li> <li>• Pos proceso en gabinete</li> <li>• Evaluación de datos con <i>Software</i> especializado</li> <li>• Resultados logrados</li> </ul>

Anexo 2: Tablas.

Tabla 1. Abaco de Clasificación geomecánica RMR de Bieniawski 1989.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		
<b>Corrección por la orientación de las discontinuidades</b>									
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
<b>Clasificación</b>									
Clase	I	II	III	IV	V				
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala				
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20				

Fuente. Ingeniería Geológica-Gonzales de Vallejo L.

**Tabla 2.** Corrección por orientación propuesto por Bieniawski 1989.

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE				RUMBO PARALELO		BUZAMIENTO
Dirección según Buzamiento		Dirección contra Buzamiento		AL EJE DEL TUNEL		
Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	
45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	0-20° <b>(Independiente del rumbo)</b>
Muy Favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Fuente: *Bieniawski* 1989.

**Anexo 3. Fotos**



**Foto 1.** Personal de voladura evaluando el resultado de voladura.

Fuente. Autor de tesis.



**Foto 2.** Personal de perforación evaluando el resultado de voladura de precorte.

Fuente. Autor de tesis.



**Foto 3.** Carguío del taladro con explosivo.

Fuente. Autor de tesis.



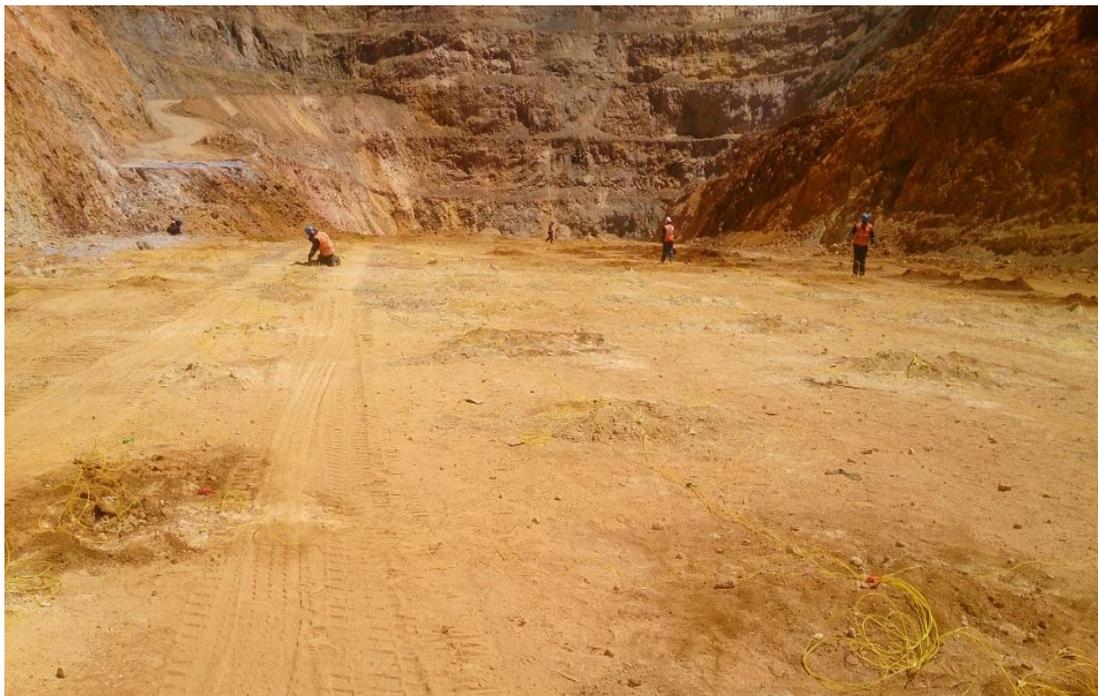
**Foto 4.** Perforación de un taladro por el carguío con explosivo.

Fuente. Autor de tesis.



**Foto 5.** Operación de perforación para producción, buffer y precorte.

Fuente. Autor de tesis.



**Foto 6.** Marcado de malla de perforación.

Fuente. Autor de tesis.