

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



**“ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO DEL PROYECTO TÚNEL  
DE INTEGRACIÓN DE LAS MINAS CARAHUACRA, SAN  
CRISTOBAL Y ANDAYCHAGUA DE LA EMPRESA VOLCAN  
COMPAÑÍA MINERA S.A.A”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:  
JORGE LUIS FLORES QUISPE**

**ASESOR  
ING. HERMAN FLORES AREVALO**

**Lima – Perú  
2015**

## **DEDICATORIA**

A mis padres que con su esfuerzo y empeño,  
me ayudaron a sobresalir en vida, a mis hermanas, a mi novia,  
profesores, colegas y amigos que aportaron,  
para mi desarrollo profesional y personal, a todos ellos,  
solo me queda dar mis muestras de afecto y estima personal.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. MBA Don Herman Flores Arévalo por su apoyo con críticas constructivas para la mejora del presente estudio, al M.Sc Ing. José Corimanya Mauricio por el soporte en la parte técnica y a la empresa Volcan Compañía Minera S.A.A que ayudo a desarrollarme profesionalmente en sus diferentes unidades mineras.

## INDICE

1.0 INTRODUCCIÓN	24
1.1 GENERALIDADES	24
1.2 OBJETIVOS	25
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO	26
1.4 ESPECIFICACIÓN DEL ESTUDIO	26
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES	27
2.0 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	30
2.1 ANTECEDENTES	30
2.2 GEOLOGÍA	34
2.2.1 Introducción	35
2.2.2 Objetivos	36
2.2.3 Alcances	36
2.2.4 Ubicación	38
2.2.5 Clima	39
2.2.6 Estudio Geológico Regional	40
2.2.6.1 Geomorfología	42
2.2.6.1.1 Valle glaciario y lomadas	42
2.2.6.1.2 Cerros y zonas de escarpas	43
2.2.6.1.3 Zona de bofedales	43
2.2.6.2 Litología y estratigrafía	44
2.2.6.2.1 Grupo Excelsior (silúrico devónico)	44
2.2.6.2.2 Grupo mitu (pérmico)	45

2.2.6.2.2.1 Volcánicos catalina	45
2.2.6.2.3 Grupo pucara (jurásico)	46
2.2.6.2.4 Grupo goyllarisquizga (cretáceo)	47
2.2.6.3 Formación chulec, pariatambo y jumasha (cretáceo)	48
2.2.6.3.1 Rocas intrusivas	48
2.2.6.3.2 Intrusivos ácidos	49
2.2.6.3.3 Intrusivos básicos	49
2.2.6.4 Depósitos cuaternarios	50
2.2.6.4.1 Depósitos glaciares	50
2.2.6.4.2 Depósitos fluvioglaciares	51
2.2.6.4.3 Depósitos coluviales y de deslizamiento	51
2.2.6.5 Marco estructural	51
2.2.6.5.1 Plegamiento	52
2.2.6.5.2 Fracturamiento	54
2.2.6.5.3 Fracturamiento y fallamiento paralelo al eje del anticlinal	54
2.2.6.5.4 Fracturamiento perpendicular al eje del anticlinal	55
2.2.7 Geología local	57
2.2.7.1 Geomorfología local	58
2.2.7.2 Litología y estratigrafía	59
2.2.7.2.1 Grupo Excélsior	59
2.2.7.2.2 Metavolcanicos	60
2.2.7.2.3 Grupo Mitu	60
2.2.7.2.4 Grupo Pucará	61
2.2.7.2.5 Grupo Goyllarisquizga	62
2.2.7.2.6 Rocas intrusivas	63
2.2.7.2.7 Depósitos cuaternarios	63
2.2.8 Yacimientos minerales	64
2.2.8.1 Yacimientos del distrito	65
2.2.8.2 Mineralización en vetas	65
2.2.8.2.1 Veta San Cristóbal	65
2.2.8.2.2 Veta Andaychagua	67
2.2.8.2.3 Sistema de vetas Virginia	68
2.3 GEOMECANICA	70
2.3.1 Objetivos y alcances	71
2.3.2 Enfoque de evaluación	72
2.3.2.1 Etapa I	72
2.3.2.2 Etapa II	73
2.3.3 Aspectos técnicos desarrollados	73
2.3.3.1 Investigaciones básicas	73

2.3.3.2 Actividades realizadas	74
2.3.3.3 Actividades de campo	75
2.3.3.4 Actividades de laboratorio	76
2.3.3.5 Actividades de gabinete	76
2.3.4 Análisis geomecánico	77
2.3.4.1 Análisis geomecánico de campo	78
2.3.4.2 Mapeo geomecánico en superficie	79
2.3.4.3 Mapeo geomecánico en labores subterráneas	79
2.3.4.4 Ensayos de campo	80
2.3.4.5 Relogeo geotécnico de sondajes diamantinos	80
2.3.4.6 Toma de muestras para ensayos	81
2.3.4.7 Investigación geomecánica de laboratorio	81
2.3.5 Caracterización geomecánica	84
2.3.5.1 Aspectos litológicos	84
2.3.5.2 Filitas	85
2.3.5.3 Conglomerados y brechas volcánicas	85
2.3.5.4 Flujos de lava, tufos, brechas y piroclastos	85
2.3.5.5 Calizas	86
2.3.6 Distribución de discontinuidades	86
2.3.6.1 Aspectos estructurales	89
2.3.6.2 Fallas	90
2.3.6.3 Diaclasas	90
2.3.7 Clasificación de la masa rocosa	92
2.3.7.1 Rocas volcánicas	95
2.3.7.2 Rocas calizas	99
2.3.7.3 Rocas filitas	103
2.3.9 Estimación de los parámetros de resistencia	108
2.3.9.1 Resistencia de la roca intacta	108
2.3.9.2 Resistencia de las discontinuidades	111
2.3.9.3 Resistencia de la masa rocosa	112
2.3.9.4 Estimación del estado tensional	114
2.3.9.5 Dirección de esfuerzos	115
2.3.9.6 Magnitud de esfuerzos	117
2.3.9.7 Estimación del estado tensional	118
3.0 MARCO TEORICO	119
3.1 EXCAVACIÓN	119
3.2 OBJETIVOS	121
3.3 ETAPAS DEL PROYECTO	121
3.4 PROGRAMA DE AVANCES	123

3.5 PROCESO CONSTRUCTIVO	125
3.5.1 Secuencia	126
3.5.2 Secciones de las labores	126
3.5.3 Métodos de excavación	127
3.5.3.1 Método a toda cara	129
3.5.4 Ciclo constructivo	130
3.5.4.1 Perforación	131
3.5.4.1.1 Componentes de la perforación	133
3.5.4.1.2 Factores influyentes	133
3.5.4.1.3 Parámetros de eficiencia	134
3.5.4.1.4 Diseño de malla	135
3.5.4.2 Voladura	138
3.5.4.2.1 Diseño del disparo	139
3.5.4.2.2 Calculo de los parámetros de voladura	142
3.5.4.3 Ventilación	143
3.5.4.4 Sostenimiento	144
3.5.4.4.1 Parámetros de diseño	145
3.5.4.5 Carguío y acarreo	147
3.5.4.5.1 Análisis del tiempo de carguío	148
3.5.4.6 Transporte	150
3.5.4.6.1 Análisis del transporte	151
3.6 OBRAS CIVILES	153
3.6.1 Obras civiles previas	154
3.6.1.1 Construcción de losas	154
3.6.1.2 Instalación de postes	155
3.6.1.3 Construcción del taller de mantenimiento	155
3.6.1.4 Construcción del sistema industrial de agua	155
3.6.1.5 Construcción de cunetas	156
3.6.1.6 Cámaras de almacenamiento y carguío	156
3.6.1.7 Refugios	157
3.6.1.8 Cámaras de subestación eléctrica.	157
3.6.1.9 Cámaras de rescate	158
3.6.2 Frentes de trabajo	158
3.6.2.1 Etapa 01	158
3.6.2.1.1 Frente 01 - SE	159
3.6.2.1.2 Frente 02 - NW	159
3.6.2.2 Etapa 02	160
3.6.2.2.1 Frente 01 - SE	160

3.6.2.2.2 Frente 02 - SW	161
3.6.3 Estándares operaciones	161
3.6.4 Componentes del proyecto	162
3.6.5 Cronograma de actividades del proyecto	162
3.7 SERVICIOS	164
3.7.1 Objetivos	165
3.7.2 Sistema industrial de agua	165
3.7.2.1 Consumo de agua	165
3.7.2.2 Cunetas	169
3.7.2.3 Desagüe por el túnel	171
3.7.2.4 Bombeo de agua	173
3.7.2.5 Selección de bombas	174
3.7.2.6 Eficiencia de la bomba	177
3.7.2.7 Motores eléctricos	180
3.7.2.8 Pérdida de altura por fricción en tubería	181
3.7.3 Sistema de aire comprimido	184
3.7.3.1 Terminología	184
3.7.3.1.1 Aire libre	184
3.7.3.1.2 Temperatura absoluta	185
3.7.3.1.3 Presión absoluta	186
3.7.3.1.4 Presión manométrica	187
3.7.3.1.5 Aire normal	187
3.7.3.1.6 Capacidad real de una compresora	187
3.7.3.1.7 Eficiencia volumétrica	188
3.7.3.1.8 Eficiencia de compresión	188
3.7.3.1.9 Eficiencia mecánica	188
3.7.3.2 Aire comprimido	189
3.7.3.3 Tipos de compresora	190
3.7.3.4 Capacidad de planta	191
3.7.3.5 Cálculo de la necesidad de aire	192
3.7.3.5.1 Ecuación de O'Hara	192
3.7.3.5.2 Comparación con otras operaciones	193
3.7.3.5.3 Cálculo detallado	193
3.7.3.6 Pérdida de presión	195
3.7.3.6.1 Ecuación de la pérdida de presión	196
3.8 VENTILACIÓN	197
3.8.1 Objetivos	198

3.8.2 Consideraciones generales	198
3.8.3 Ingeniería del sistema de ventilación	199
3.8.3.1 Volumen	199
3.8.3.2 Presión	200
3.8.3.3 Potencia – Trabajo	202
3.8.3.4 Efectos del entorno	202
3.8.3.5 Altitud	203
3.8.3.6 Temperatura	203
3.8.3.7 Grado de saturación y humedad	204
3.8.3.8 Presión positiva y negativa	205
3.8.4 Leyes del sistema de ventilación	206
3.8.4.1 Primera ley – flujo	206
3.8.4.2 Segunda ley – presión	206
3.8.4.3 Tercera ley – potencia	207
3.8.4.4 Cuarta ley – densidad	207
3.8.5 Ecuaciones básicas	208
3.8.5.1 Ecuación de Atkinson	208
3.8.5.2 Ecuación de la presión de la velocidad	209
3.8.5.3 Ecuación de los caballos de fuerza del aire	210
3.8.6 Lecturas de las curvas de un ventilador	210
3.8.7 Procedimiento de diseño	213
3.8.8 Sistema principal y secundario del túnel	214
3.9 EVALUACIÓN ECONOMICA	215
3.9.1 Objetivos	217
3.9.2 Conceptos básicos	217
3.9.2.1 Formulación	217
3.9.2.2 Evaluación	218
3.9.3 Variables del proyecto	221
3.9.3.1 Inversiones	222
3.9.3.2 Ingresos	222
3.9.3.3 Costos del proyecto	222
3.9.3.4 Horizonte del proyecto	223
3.9.3.5 Tasa de descuento	224
3.9.4 Alcance del estudio del proyecto	224
3.9.4.1 Viabilidad comercial o del mercado	225
3.9.4.2 Viabilidad técnica	225
3.9.4.3 Viabilidad de la plataforma jurídica	225
3.9.4.4 Viabilidad de la gestión	226
3.9.4.5 Viabilidad financiera	226

3.9.5 Indicadores de gestión de un proyecto	226
3.9.5.1 Índices de eficiencia	227
3.9.5.2 Índices de eficacia	227
3.9.5.3 Índices de efectividad	227
3.9.5.4 Índices de impacto	228
3.9.5.5 Índices de igualdad	228
3.9.5.6 Índices de actividad	228
3.9.6 Valor del dinero	229
3.9.6.1 Capitalización de intereses	230
3.9.6.2 Interés simple	230
3.9.6.3 Interés compuesto	231
3.9.6.4 Tasa de interés nominal y efectiva	231
3.9.7 Valor presente – VPN ó VAN	232
3.9.7.1 Utilización del VPN	233
3.9.7.2 Ecuaciones para el cálculo de VPN	234
3.9.7.3 Ventajas y desventajas del VAN	238
3.9.8 Tasa interna de retorno – TIR	238
3.9.9 Relación del VPN y la TIR	239
3.9.9.1 Ventajas y desventajas de la TIR	241
3.9.9.2 Tasa mínima atractiva de retorno	241
3.9.9.3 Calculo del VAN y la TIR para el proyecto	242
4.0 METODOLOGÍA DEL PROYECTO TESIS	243
4.1 METODOLOGÍA	243
4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	244
4.3 HIPÓTESIS	246
4.4 DISEÑO O MODELO UTILIZADO	246
4.5 PROCEDIMIENTO	247
5.0 RESULTADOS	248
5.1 CALCULO DE LOS COSTOS	249
5.1.1 Mano de obra	249
5.1.2 Gastos generales	250
5.1.3 Materiales de perforación	250
5.1.4 Herramientas	251
5.1.5 Materiales de seguridad y EPP's	252
5.1.6 Equipos	252
5.1.7 Servicios Túnel	253

5.1.8 Sostenimiento	254
5.1.9 Explosivos y accesorios de voladura	254
5.110 Transporte	255
5.111 Infraestructura	255
5.2 CAPEX TOTAL DEL PROYECTO	256
5.3 CALCULO DE LOS COSTOS ACTUALES	259
5.4 ESCENARIO ACTUAL DEL TRANSPORTE	260
5.5 ESCENARIO DEL TRANSPORTE CON EL TÚNEL DE	263
5.6 AHORRO EN EL TRANSPORTE DE MINERAL	264
5.7 CALCULO DEL VAN TIR	266
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	269
BIBLIOGRAFÍA	275

## INDICE DE FIGURAS

Figura 01:	Plano de ubicación del Proyecto Túnel de Integración	38
Figura 02	Vista Panorámica del Grupo Gollarisguizga	47
Figura 03:	Vista del Pliegue en el Pucará	53
Figura 04:	Vista de las Filitas del Excélsior	60
Figura 05:	Roca del Mitu – Continental	61
Figura 06:	Roca del grupo Pucará	62
Figura 07:	Frente Fracturas del Túnel Victoria	63
Figura 08:	Vetillas de cuarzo	64
Figura 09:	Roseta de buzamiento	88
Figura 10:	Ploteo y gráfica del sistemas de discontinuidades.	89
Figura 11:	Orientación de los esfuerzos principales	116
Figura 12:	Diagrama del Gantt del Proyecto Túnel de Integración	122
Figura 13:	Secciones típicas en tunelería	127
Figura 14:	Esquema de perforación - Perfil longitudinal	129
Figura 15:	Esquema de perforación – Isométrico	130
Figura 16:	Ciclo constructivo – perfil circular	131

Figura 17:	Ciclo constructivo – perfil longitudinal	131
Figura 18:	Aplicación del sistema de perforación	132
Figura 19:	Aplicación del carguío de voladura	139
Figura 20:	Aplicación del sistema de ventilación	144
Figura 21:	Aplicación del sostenimiento	144
Figura 22:	Cronograma de actividades del frente 01	163
Figura 23:	Cronograma de actividades del frente 02	163
Figura 24:	Esquema del cálculo del caudal $Q$ en una cuneta	168
Figura 25:	Esquema general de la evaluación de proyectos	219
Figura 26:	Cálculo del valor futuro (F)	235
Figura 27:	Cálculo del valor actual (P)	235
Figura 28:	Serie uniforme de pagos y su relación con el presente (P)	236
Figura 29:	Cálculo del valor actual a partir de una serie de anualidades (A)	236
Figura 30:	Cálculo del valor futuro a partir de una serie uniforme de pagos	237
Figura 31:	Cálculo de las anualidades a partir de un valor futuro	237
Figura 32:	Procedimiento de viabilidad del proyecto	247
Figura 33:	VAN y TIR escenario actual	267
Figura 34:	VAN y TIR con incremento de producción	267

## INDICE DE TABLAS

Tabla 01:	Especificación del proyecto tesis	27
Tabla 02:	Reporte de reservas	31
Tabla 03:	Reporte de recursos	31
Tabla 04:	Producción de minas y costos	32
Tabla 05:	Tratamiento en plantas y costos	32
Tabla 06:	Ensayos solicitados al laboratorio	83
Tabla 07:	Principales sistemas de discontinuidades	87
Tabla 08:	Criterios para la clasificación geomecanica	92
Tabla 09:	Clasificación geomecanica RMR <sup>89</sup>	94
Tabla 10:	Resultado de los ensayos realizados en campo	109
Tabla 11:	Resultado de los ensayos en laboratorio	110
Tabla 12:	Resultado de los ensayos de resistencia al corte	112
Tabla 13:	Parámetros de resistencia de la masa rocosa	113
Tabla 14:	Magnitud de esfuerzos principales	117
Tabla 15:	Programa de metros de avance	123

Tabla 16:	Programa de metros de avance del Túnel	124
Tabla 17:	Parámetros de diseño	127
Tabla 18:	Tipos de taladros y metros perforados	137
Tabla 19:	Parámetros de diseño de la perforación	138
Tabla 20:	Variable del diseño de voladura	141
Tabla 21:	Cantidad de carga explosiva por tipo y labor	143
Tabla 22:	Índices de explosivos y accesorios de voladura (unid/mt)	143
Tabla 23:	Índice de consumo del shotcrete por labor (m <sup>3</sup> /mt)	145
Tabla 24:	Índice de consumo de los pernos helicoidales por labor (pza/mt)	146
Tabla 25:	Índice de pernos Split set por labor	146
Tabla 26:	Índice de consumo de los elementos de sostenimiento (uni/mt)	147
Tabla 27:	Parámetros de tiempo y propiedades del macizo	149
Tabla 28:	Rendimientos en Ton/hr según la distancia	150
Tabla 29:	Toneladas de desmonte por labor	151
Tabla 30:	Rendimiento del volquete	152
Tabla 31:	Balance de agua en el Proyecto Túnel de Integración	166
Tabla 32:	Medida del flujo de agua USGPM – regla práctica	167
Tabla 33:	Flujo de un hueco de 1.38” de diámetro	169
Tabla 34:	Calculo de las filtraciones de agua en el Túnel de Integración GPM	170
Tabla 35:	Capacidad estándar de la Cuneta en un Túnel de Drenaje	172
Tabla 36:	Área verdadera de salida	175

Tabla 37:	Costo de bombeo por profundidad	179
Tabla 38:	Tabla estándar de motores eléctricos	180
Tabla 39:	Tabla Pérdidas de Altura (Head) en Pies por 100 Pies de tubería de acero	183
Tabla 40:	Presión atmosférica a nivel del mar	186
Tabla 41:	Comparativo con otras minas	193
Tabla 42:	Detalle del uso de equipo	194
Tabla 43:	Perdidas por fricción en tuberías de aire	195
Tabla 44:	Etapas del proceso constructivo	214
Tabla 45:	Qué significa formular un proyecto	218
Tabla 46:	Significado de los valores del VPN	233
Tabla 47:	Costo actual de transporte de mineral	244
Tabla 48:	Evolución de los costos de transporte	245
Tabla 49:	Distribución de los costos	249
Tabla 50:	Costo de la mano de obra	250
Tabla 51:	Gastos generales	250
Tabla 52:	Costo de aceros, accesorios y materiales de perforación	251
Tabla 53:	Costo de las herramientas	251
Tabla 54:	Costo de los EPP's y materiales	252
Tabla 55:	Costo de equipos	253
Tabla 56:	Costo de los servicios túnel	253
Tabla 57:	Costos de los elementos de sostenimiento	254
Tabla 58:	Costo de explosivos y accesorios de voladura	255
Tabla 59:	Costo del transporte de desmonte	255

Tabla 60:	Costo de infraestructura	256
Tabla 61:	Inversión total del proyecto Túnel de Integración	257
Tabla 62:	Costos unitarios del proyecto Túnel de Integración	258
Tabla 63:	Costos unitarios por metro lineal de avance	259
Tabla 64:	Costo de las actividades del ciclo de minado	259
Tabla 65:	Rutas de traslado de mineral	261
Tabla 66:	Costo de traslado de mineral – Ruta 01	262
Tabla 67:	Costo de traslado de mineral – Ruta 02	262
Tabla 68:	Nuevo costo de traslado de mineral por la ruta 01	263
Tabla 69:	Nuevo costo de traslado de mineral por la ruta 02	264
Tabla 70:	Ahorro en el costo del transporte de mineral	265
Tabla 71:	Simulación del ahorro por incremento de producción	265

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 01: Diagrama de Gantt del Proyecto Túnel de Integración.
- Anexo 02: Diagrama de Redes del Proyecto Túnel de Integración.
- Anexo 03: Programa detallado de los metros de avances y extracción de desmonte.
- Anexo 04: Calculo del burden y espaciamiento según Langerfors y Holmberg
- Anexo 05: Vida útil, rendimientos, costos de aceros y accesorios de perforación.
- Anexo 06: Detalle del consumo de explosivos y accesorios de voladura.
- Anexo 07: Detalle de los índices de consumo de los elementos de sostenimiento.
- Anexo 08: Calculo del rendimiento del scoop en función a la distancia.
- Anexo 09: Detalle del análisis del sistema de transporte por volquetes.
- Anexo 10: Balance de la energía.
- Anexo 11: Necesidad de energía según la distancia de avance.
- Anexo 12: Cronograma de actividades de obras civiles.
- Anexo 13: Balance de aire
- Anexo 14: Diseño del sistema de ventilación
- Anexo 15: Calculo de las leyes y beneficios sociales

- Anexo 16: Detalle de la mano de obra en cantidad y costos
- Anexo 17: Calculo de los gastos generales
- Anexo 18: Detalle de los costos de los gastos generales
- Anexo 19: Detalle de los costos de perforación
- Anexo 20: Detalle de los costos de herramientas
- Anexo 21: Rendimientos de los EPP's
- Anexo 22: Detalle de los costos de los EPP's
- Anexo 23: Cálculo de los costos horarios de los equipos
- Anexo 24: Determinación de los rendimientos de los equipos
- Anexo 25: Detalle de los costos de los equipos a utilizar
- Anexo 26: Calculo de los costos de instalación de servicios túnel
- Anexo 27: Detalle de los costos de servicios túnel
- Anexo 28: Detalle de los costos los elementos de sostenimiento
- Anexo 29: Detalle de los costos de explosivos y accesorios de voladura
- Anexo 30: Calculo de la cantidad de desmonte y el costo de transporte
- Anexo 31: Calculo del costo de transporte por el Túnel de Integración

## LISTA DE PLANOS

TES-PTI-2015-IB-001:	Plano de ubicación
TES-PTI-2015-IB-002:	Plano de componentes de UEA Yauli
TES-PTI-2015-IB-003:	Plano de etapas de construcción
TES-PTI-2015-IB-004:	Plano de fases de construcción
TES-PTI-2015-IB-005:	Emplazamiento del proyecto sobre la geología regional
TES-PTI-2015-IB-006:	Emplazamiento del Proyecto sobre la Geología Estructural
TES-PTI-2015-IB-007:	Diseño en planta
TES-PTI-2015-IB-008:	Reservas con el Proyecto Túnel de Integración
TES-PTI-2015-IB-009:	Componentes de servicio Túnel
TES-PTI-2015-IB-010:	Malla de perforación según Langerfors.
TES-PTI-2015-IB-011:	Distribución y secuencia de salida de los taladros.
TES-PTI-2015-IB-012:	Halos de liberación de energía según Holmberg.
TES-PTI-2015-IB-013:	Etapas del sistema de ventilación

TES-PTI-2015-IB-014:	Ubicación de los ventiladores de 110KCFM
TES-PTI-2015-IB-015:	Esquema general del sistema de ventilación
TES-PTI-2015-IB-016:	Geología Regional
TES-PTI-2015-IB-017:	Geología local
TES-PTI-2015-IB-018:	Modelo estructural del domo de Yauli
TES-PTI-2015-IB-019:	Modelo de mineralización de San Cristóbal
TES-PTI-2015-IB-020:	Modelo de mineralización de Veta 722
TES-PTI-2015-IB-021:	Modelo de mineralización de Carahuacra
TES-PTI-2015-IB-022:	Modelo de mineralización de Andaychagua
TES-PTI-2015-IB-023:	Zonificación geomecanica
TES-PTI-2015-IB-024:	Modelo geológico – geomecanico
TES-PTI-2015-IB-025:	Sección típica del túnel de integración
TES-PTI-2015-IB-026:	Diseño de los refugios
TES-PTI-2015-IB-027:	Ampliación de sección o desquinche
TES-PTI-2015-IB-028:	Nomenclatura de labores
TES-PTI-2015-IB-029:	Instalación de alcayatas para energía
TES-PTI-2015-IB-030:	Instalación de pernos Split set de 7ft
TES-PTI-2015-IB-031:	Instalación de pernos helicoidales de 10ft
TES-PTI-2015-IB-032:	Instalación de shotcrete
TES-PTI-2015-IB-033:	Instalación de luminarias
TES-PTI-2015-IB-034:	Instalación de alcayatas para servicios

## RESUMEN

La presente, Proyecto de Tesis “Estudio - Técnico Económico del Proyecto Túnel de Integración de las Minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua”, detalla la ingeniería a nivel de factibilidad de dicha construcción con el objetivo de reducir el OPEX de la unidad Yauli; principalmente los costos de transporte de mineral de manera cuantitativa y los beneficios que aportará dicho activo con su construcción como por ejemplo: el mejoramiento del sistema de ventilación, incremento de la productividad, desarrollo del sistema de transporte del relleno hidráulico hacia las minas, progreso en el sistema de energía, incremento de producción de las minas, reducción de los impactos ambientales, mejor relación con las comunidades, entre otros.

El trabajo ha sido desarrollado gracias al apoyo de la empresa Volcan Compañía Minera S.A.A y a la supervisión de las diferentes áreas de la unidad Yauli, que en conjunto y en base a su experiencia en el negocio, han podido aportar con diferentes alternativas para la ejecución y optimización del proceso constructivo. Quiero mencionar el soporte técnico de colegas del área de seguridad, operaciones, ingeniería, medio ambiente y legal quienes con sus críticas me ayudaron hacer una tesis más robusta en lo técnico y en lo económico, siendo el presente proyecto de tesis un trabajo estratégico para el beneficio de la unidad Yauli.

## **ABSTRACT**

The present thesis project "Study - Tunnel Technical Economic Integration Project of Carahuacra, San Cristobal and Andaychagua Mines" detailed engineering feasibility level of such construction in order to reduce the OPEX of the UEA Yauli; transportation costs mainly ore quantitatively and benefits that bring the asset to its construction such as: improving the ventilation system, increasing productivity, development of the transport system of hydraulic fill to the mines, progress power system, increased mining production, reduced environmental impacts, improved community relations, among others.

The work has been developed with the support of the Volcan Compañía Minera S.A.A and supervision of the different areas of the UEA Yauli, which together and based on its experience in the business, have been able to provide different alternatives for implementation and optimization of the construction process. I want to mention the support of colleagues in the area of security, operations, engineering, environmental and legal who with his criticism helped me make a stronger argument technically and economically, being the present thesis project for strategic work The UEA Yauli benefit.

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 GENERALIDADES**

La presente, Proyecto de Tesis, contiene el análisis técnico-económico final a nivel de ingeniería de factibilidad, para la construcción del Túnel de Integración de las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua, ubicada en la unidad económica administrativa de Yauli, propiedad de VOLCAN COMPAÑÍA MINERA S.A.A.

En los diferentes apartados se muestran los resultados obtenidos de los estudios geológicos y geomecánicos, efectuados en el Túnel Victoria de 5.50 km de longitud (en actual operación) y los trabajos ejecutados en el Crucero (Xc) 810, los cuales han sido el soporte necesario para realizar proyecciones

de su construcción. Se ha determinado los recursos a utilizar (agua, aire, energía, materiales, mano de obra, equipos e infraestructura), también se realizó un análisis detallado del sustento económico, el cual será llevado a los accionistas para la buena pro de su inversión y ejecución.

Para culminar, se determinó el CAPEX que permitirá mantener una construcción independiente y autónoma en sus decisiones, de manera que se los resultados se vean reflejados en la creación de valor para las minas (CAR-SCR-AND) de las unidad Yauli, al finalizar dicho proyecto.

## **1.2 OBJETIVOS**

Desarrollar la ingeniería a nivel de factibilidad para la construcción del Túnel de Integración de las Minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua, esta ingeniería comprende para la excavación, el sostenimiento y demás trabajos de servicios (agua, aire, energía y ventilación), así como la evaluación económica necesaria para su construcción con altos estándares de seguridad, calidad, generando de esta manera el incremento de valor de las acciones para la corporación VOLCAN COMPAÑÍA MINERA S.A.A en el mediano y largo plazo.

### **1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

El estudio, se circunscribe a un estudio descriptivo, la recolección de datos y simulaciones, esto ha permitido detallar las actividades operativas del proceso constructivo que se aplican en la ingeniería de túneles, todos los resultados se exponen de manera sistemática y se interpretan objetivamente.

La investigación (Geología y Geomecánica) se desarrolló directamente en campo, laboratorios y con el soporte de las áreas de la operación mina; se mantuvo una relación directa con las fuentes de información tanto a nivel general como individual. Se observaron las actividades del proceso constructivo de rampas y cruceros que se realizaron en otras unidades de la corporación. También en este ambiente se aplicaron encuestas y entrevistas a colegas de diferentes áreas de la unidad Yauli, su aporte fue trascendental para la elaboración de este estudio.

### **1.4 ESPECIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

El estudio se enmarca en el desarrollo ingenieril a nivel de factibilidad de la evaluación técnica – económica del Proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra, san Cristóbal y Andaychagua, dicho estudio contempla las actividades del ciclo constructivo y los detalla a fin de obtener una operación con altos estándares de seguridad y calidad. Las tareas a realizar dentro del presente informe son:

Tabla 01: Especificación del proyecto tesis

Ítem	Descripción
1.0	Caratula
2.0	Índice
3.0	Prologo
4.0	Introducción
5.0	Antecedentes
6.0	Marco teórico
7.0	Metodología
8.0	Resultados
9.0	Conclusiones y recomendaciones
10.0	Bibliografía
11.0	Apéndice o anexos

## 1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES

El proyecto considera pero no se limita a las diferentes obras de construcción, equipamiento y servicios para disponer de una infraestructura que permita la extracción de mineral de las minas de CAR, SCR y AND, desde los niveles -1270, -1220, -1020 al nivel -820 y entregar los mismos a la Planta Concentradora Victoria y/o Andaychagua.

- ❖ El proyecto Túnel de Integración tendrá una longitud de 9,221 metros, será relativamente horizontal con pendiente positiva de 0.3%, paralela al Túnel Victoria actual y superpuesta al Crucero 810 con dirección a la mina Andaychagua, intersectándola en el nivel 4,230 (Nivel 770).

- ❖ La sección final será de 5.5 x 5.5 m, será iluminada y estandarizada en toda su longitud, posteriormente a su construcción el Túnel Victoria será una labor de drenaje únicamente, derivando las aguas a su planta de tratamiento de agua residuales (PTAR). La ventilación se realizará a través del mismo túnel y con conexión a Raise Borers de ventilación existente en la mina, los cuales son comunicados a superficie directamente.
- ❖ Utilizaremos cables de energía de aluminio de 10KV de manera que generemos sub estaciones con esta potencia, abarcando más radio de influencia y por ende menores cámaras de subestación eléctrica
- ❖ El agua industrial será tomada de la quebrada Chumpe, donde aprovecharemos la gravedad para abastecer de dicho recurso a las operaciones unitarias de perforación, lanzado de shotcrete, limpieza, lavado de equipos y concreto armado.
- ❖ Para la presente tesis se ha planteado la ejecución del Túnel por dos frentes y en dirección al encuentro, siendo el tiempo de ejecución del activo de 37 meses. Se construirán cámaras de almacenamiento y carguío tipo delta cada 200.00 metros utilizando un scoop de 6.0 yd<sup>3</sup>.
- ❖ Las sub estaciones eléctricas se ejecutarán cada 400 metros, su construcción se realizará en las mismas cámaras de almacenamiento y carguío antes construidas. De esta manera se justifica la no construcción de otra labor.

- ❖ El desmonte producto de las excavaciones será depositará en la desmontera Huaripampa o en su defecto en la plataforma temporal para proyectos o como relleno detrítico para los tajeos de la operación mina.
- ❖ El sostenimiento aplicar, dependerá del análisis geomécanico, sustentado en la presente tesis y variara según las condiciones insitu de excavabilidad que se dieran en el momento de su construcción.
- ❖ La operación deberá ser tercerizada, más no así la supervisión de control del proyecto. También deberá contar con su propio ambiente administrativo para fiscalizar a la empresa especializada, la idea es obtener índices operativos para futuros proyectos a beneficio de la corporación.

## **CAPITULO II**

### **ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Las reservas calculadas a diciembre del 2014, fueron determinadas con los siguientes precios de los metales: 6,500 \$/ton Cu; 2,000\$/ton Pb; 2,200 \$/ton Zn; 18\$/Oz Ag y estas se muestran en las tablas 02 y 03 las cuales son independientes:

Tabla 02: Reporte de reservas

<b>Minas</b>	<b>Reservas</b>	<b>Zn%</b>	<b>Pb%</b>	<b>Cu%</b>	<b>Ag Oz</b>	<b>A.V</b>
CAR	3,264,100.00	6.92	0.41	0.05	2.27	5.45
SCR	16,007,961.00	6.08	1.10	0.17	4.05	4.42
AND	7,661,406.00	4.42	0.77	0.14	5.81	5.67
TIC	1,885,989.00	4.63	1.48	0.26	1.84	6.44
<b>TOTAL</b>	<b>28,819,456.00</b>	<b>5.64</b>	<b>0.96</b>	<b>0.16</b>	<b>4.17</b>	<b>5.00</b>

Tabla 03: Reporte de recursos

<b>Minas</b>	<b>Reservas</b>	<b>Zn%</b>	<b>Pb%</b>	<b>Cu%</b>	<b>Ag Oz</b>	<b>A.V</b>
CAR	3,412,394.00	3.49	0.70	0.13	2.10	4.58
SCR	19,982,296.00	6.03	1.03	0.27	4.60	4.58
AND	10,703,531.00	3.20	0.64	0.13	2.20	4.40
TIC	6,626,947.00	4.71	1.13	0.26	1.72	4.00
<b>TOTAL</b>	<b>40,725,168.00</b>	<b>4.86</b>	<b>0.92</b>	<b>0.22</b>	<b>3.29</b>	<b>4.44</b>

La producción actual de las minas Carahuacra (CAR), San Cristóbal (SCR), Andaychagua (AND) y Tielio (TIC) es como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 04: Producción de minas y costos

<b>Minas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Producción</b>	<b>Costo de Transporte US\$/ton</b>
CAR	tpd	1,800.00	5.45
SCR	tpd	4,600.00	6.62
AND	tpd	3,400.00	5.20
TIC	tpd	1,150.00	4.80
<b>Total</b>	<b>tpd</b>	<b>10,950.00</b>	<b>5.80</b>

Dicha producción es destinada las plantas: Marh túnel, Victoria y Andaychagua de la siguiente manera:

Tabla 05: Tratamiento en plantas y costos

<b>Planta</b>	<b>Minas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Producción</b>	<b>Costo Tratamiento US\$/ton</b>
Marh Túnel	SCR	tpd	1,200.00	6.40
Marh Túnel	TIC	tpd	1,150.00	
Victoria	CAR	tpd	1,800.00	5.60
Victoria	SCR	tpd	3,400.00	
Andaychagua	AND	tpd	3,400.00	6.50
<b>Total</b>		<b>tpd</b>	<b>10,950.00</b>	<b>6.05</b>

El Túnel Victoria es parte integral de la mina CAR, tiene una longitud de 5.50 km, medidos desde la Planta Concentradora Victoria hasta las tolvas (780, 960, 223, 384) ubicadas en el nivel 820 de las minas CAR - SCR. De ambas labores se extrae mineral a razón de 3,400 tpd, mediante un sistema de

transporte sobre rieles. La diferencia de mineral extraído (3,000 tpd), es trasladado hacia superficie y depositadas en las canchas 500 y/o 600, para luego ser transportadas hacia la planta de Marh Túnel, Victoria o Andaychagua dependiendo del mejor blending que se necesite. Todo el mineral extraído en la mina Andaychagua es tratado en su planta y en casos excepcionales su mineral también puede ser traslado a la planta Victoria; en ambos escenarios actuales, el costo por transporte de mineral es alto e incrementará con la profundización de las minas.

Actualmente este esquema de producción presenta serias limitaciones para sostener una operación continua y permanente, debido entre otras condiciones al incremento del costo de transporte de mineral por la profundización de las minas, los temas de ventilación, servicios mina (agua, aire, desagüe, relleno hidráulico), bajos rendimiento de productividad, traslado del personal, desfases entre el desarrollo, preparación y explotación de las minas, entre otros.

VOLCAN COMPAÑÍA MINERA S.A.A, tiene proyectado mejorar el incremento de la capacidad de tratamiento de la Planta Victoria y Andaychagua hasta alcanzar las 8,000 tpd y 6,000 tpd para el año 2,019. Esta circunstancia induciría a construir un Túnel que permita intersectar a las minas CAR, SCR y AND; contribuyendo a elevar el volumen de producción y minimizar los costos de la UEA Yauli. Con la construcción del Túnel de Integración se pretende abastecer de mineral a las plantas Victoria y

Andaychagua y en el largo plazo (2,019) construir un pique de 7,000 tpd para CAR y SCR y de 600 metros de longitud en la zona de SCR de manera que podamos continuar con la profundización de la mina y obtener un incremento de volumen de mineral con bajos costos de producción.

En atención a lo indicado se precisa efectuar la ingeniería a nivel de factibilidad del Proyecto de Tesis Túnel de Integración. Bajo esta consideración se ha realizado el cronograma de actividades necesarios, que permitan su evaluación técnica – económica y justificar mediante los indicadores VAN-TIR la construcción de dicho activo, dando una producción sostenida, con altos estándares de seguridad, minimizando los impactos ambientales y manteniendo buenas relaciones con las comunidades.

## **2.2 GEOLOGÍA**

La Unidad Minera se ubica en el flanco Este de la Cordillera Central de los Andes Peruanos, altitud promedio de 4,150 a 4,700 m.s.n.m. El distrito minero de Yauli tiene una extensión cercana a 35 kilómetros cuadrados, la accesibilidad es por la Carretera Central a la altura del poblado de Pachachaca Kilometro 20 aproximadamente, desvió hacia CAR, SCR y AND.

El distrito minero es bastante antiguo donde los primeros trabajos geológicos fueron realizados por personal de la empresa Cerro de Pasco Corporation,

entre los años 1928 a 1930, posteriormente por personal de Centromín-Perú y luego por el personal de Volcán Compañía Minera S.A.A.

En el informe más reciente se menciona condiciones geológicas, litológicas y estructurales la UEA Yauli, para el desarrollo del proyecto, esta evaluación tuvo como propósito determinar condiciones litológicas y estructurales de la roca volcánica formación Catalina emplazada en las unidades Carahuacra y San Cristóbal, principalmente.

Como parte del análisis se evaluó las condiciones geológicas – geotécnicas, desarrollando una evaluación geológica cuyo objetivo fue: verificar los contactos litológicos, comportamiento estructural, calidad del macizo rocoso y desarrollar la ingeniería a nivel de factibilidad del Proyecto Túnel de Integración.

### **2.2.1 Introducción**

En junio del 2012 el Ing. Max Yupanqui B, Geólogo Consultor, elaboró informes más recientes, este estudio comprendió las disposiciones de Volcán Compañía Minera (VCM) que se detallan a continuación:

- ❖ En superficie, se evaluó las condiciones litológicas, estructurales, de alteración de la volcánica Catalina que es la unidad estratigráfica principal por donde se emplazara el eje del Túnel Victoria, de las filitas del Grupo Excelsior, así mismo desarrolló un preliminar del Modelo Geológico del Túnel Victoria. Cabe aclarar que este estudio es la base de la presente tesis.
- ❖ Estudio de Caracterización Geomecánica de la Túnel Victoria cuyo alcance fue la evaluación y caracterización de la Masa Rocosa y su entorno físico” con la finalidad de conceptualizar el modelo Geomécánico asociado al Proyecto Túnel de Integración.

### **2.2.2 Objetivos**

El presente estudio tiene por objetivo principal desarrollar un modelo geológico – geotécnico, donde se emplazará el Proyecto Túnel de Integración de las minas CAR, SCR y AND, esto establece la caracterización y descripción de los materiales y zonificación de los tipos de rocas.

### **2.2.3 Alcances**

Para cumplir con el objetivo planteado, se realizó la Evaluación Geológica - Geomecánica del trazo proyectado del Túnel de Integración, en base a la

revisión de estudios anteriores. Para el cumplimiento de dicha evaluación se desarrollaron diferentes estudios:

- ❖ Las evaluaciones de la geología de superficie nos permiten relacionarla con la geología del Túnel Victoria y del Xc 810, principalmente en los primeros metros del trazo propuesto a fin de definir convenientemente el portal de ingreso de la Boca del Túnel.
- ❖ Caracterización e investigación geológica en superficie en el Trazo del Túnel, el cual está orientado al estudio del macizo rocoso donde se emplazara el Túnel para esto se realizó una cartografía geológica-geotécnica local, en la que se identificaron los diferentes tipos de rocas, rumbo, buzamiento de todas las discontinuidades (estratos, fallas, diaclasas, juntas, contactos, etc.).
- ❖ Confrontar los estudios anteriores, con los resultados obtenidos a fin de evaluar el comportamiento de los parámetros geomecánicos y establecer las causas y alternativas de soluciones a los problemas encontrados.
- ❖ Efectuar las recomendaciones necesarias para optimizar el desarrollo del Proyecto.

### 2.2.4 Ubicación

La UEA Yauli, donde se emplaza el Proyecto Túnel de Integración de las minas CAR, SCR y AND, se encuentra en el flanco este de la Cordillera de los Andes Centrales del Perú, ubicada en el distrito de Yauli - la Oroya, Departamento de Junín, con altitudes promedio entre los “4,150.00 - 4,700.00 m.s.n.m.”

El acceso desde la ciudad de Lima a la UEA Yauli, donde se ejecutará el Proyecto Túnel de Integración, se realiza a través de la ruta principal siguiendo la Carretera Central: “Lima - La Oroya”, “La Oroya – Mahr Túnel – Yauli - Mina Carahuacra - Mina San Cristóbal - Mina Andaychagua”. El tiempo promedio de viaje en la ruta indicada varía aproximadamente entre 4 a 6 horas dependiendo mucho de las condiciones climáticas y el tráfico en la ruta indicada.

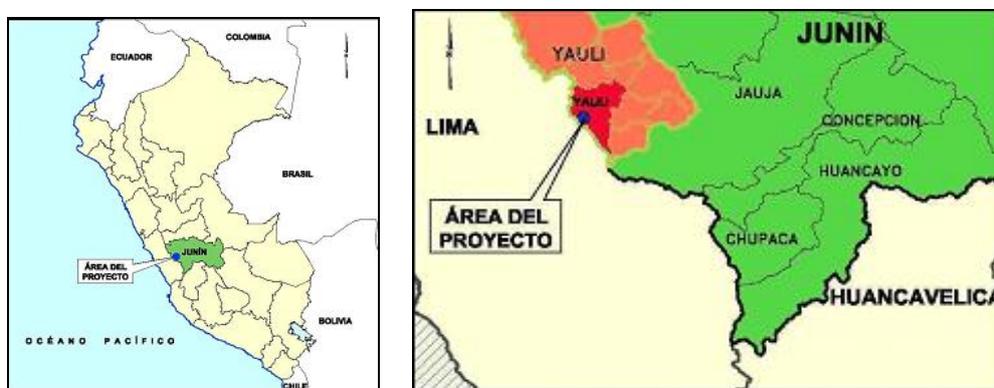


Figura 01: Plano de ubicación del Proyecto Túnel de Integración

### 2.2.5 Clima

El clima de la zona es generalmente frío y seco, como corresponde a la región Puna, con presencia estacional de grandes precipitaciones pluviales, se reseña las condiciones climáticas tomadas de los estudios y monitoreo anteriormente desarrollados por el área de medio ambiente:

- Temperatura máxima 17°C.
- Temperatura promedio en verano 15°C.
- Temperatura promedio en invierno 10°C.
- Velocidad del viento máxima de 36 km/h.
- Evaporación de 3,3 cc/hora.

Durante los meses comprendidos entre noviembre y abril se producen grandes precipitaciones pluviales, nevadas y granizadas. En los meses de mayo a octubre las condiciones son de sequía.

### **2.2.6 Estudio Geológico Regional**

Las Unidades Económicas Administrativas de Yauli se ubican en el flanco Este de la Cordillera de los Andes Centrales del Perú, al Este de la divisoria continental a una altitud promedio de 4150 - 4 700 m.s.n.m.

La región se caracteriza por un marcado intemperismo de las formaciones geológicas que han determinado una topografía suave y abrupta. En el valle del río Yauli la topografía es bastante extendida formando planicies con extensiones importantes, especialmente en las cercanías de la Planta Concentradora de Mahr Túnel.

La morfología en la zona presenta relieves suaves y accidentados sus pendientes elevadas (35° a 48°), en zonas rocosas.

El distrito minero de San Cristóbal está localizado en la parte Sur Oeste de una amplia estructura regional del Domo que abarca casi íntegramente los distritos de Morococha, San Cristóbal y Andaychagua. Esta estructura inicialmente fue denominada Complejo Domal de Yauli, actualmente recibe el nombre de Domo de Yauli y representa una ventana de formaciones Paleozoicas dentro de la faja intracordillerana de formaciones Mesozoicas. El Paleozoico tiene dos pisos, el inferior formado por el grupo Excélsior y el

superior por el grupo Mitu; el Excélsior está aflorando a lo largo del anticlinal de Chumpe en la parte Oeste del Domo y en el anticlinal de Ultimátum hacia el Este; el Mitu aflora en la mayor parte del Domo.

Litológicamente las rocas que afloran en el área de estudio están comprendidas en edades desde el Paleozoico Inferior, Cretáceo Medio, Terciario y depósitos del Cuaternario. Los Intrusivos de composición intermedia y básicos han cortado enteramente la secuencia estratigráfica del anticlinal de Chumpe dando origen a la mineralización, la cual se encuentra rellenando tanto fracturas de tensión y cizallamiento en el núcleo y flancos del pliegue de Chumpe como también remplazando capas calcáreas en el flanco Occidental de la misma estructura.

Estructuralmente las fallas y fracturas transversales al Domo de Yauli fueron importantes para los depósitos tipo vetas y cuerpos los que están localizados en fallas normales con rumbo general Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste respectivamente.

El Domo de Yauli está constituido por rocas sedimentarias cuyas edades fluctúan entre el Paleozoico inferior y el Cretácico Medio arregladas en una serie de anticlinales y sinclinales de ejes aproximadamente paralelos; así los depósitos minerales de San Cristóbal y Carahuacra se localizan dentro del

llamado "Anticlinal de Chumpe", cuyo eje se alinea en dirección N° 45 o mostrando doble hundida hacia el Norte y hacia el Sur.

#### 2.2.6.1 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas en las zonas de evaluación han sido clasificadas en geomorfología de erosión y geomorfología de acumulación, los que a continuación se describen:

##### 2.2.6.1.1 Valle glaciar y lomadas

Este tipo de geomorfología, está constituida por típicos valles glaciares en forma de U que discurren en dirección NW y SE controladas por las estructuras de rumbo andino, con un relieve suave y moderado y con pendientes mayormente menores a 30 % en el sector noroeste que corresponden a las cabeceras de las quebradas; en algunos sectores como en la parte intermedia de la Qda. Andaychagua las pendientes son mayores, aproximadamente entre 30% y 40%, formadas por depósitos morrénicos y/o fluvio-glaciares, y en muy reducidos sectores como en la Qda. Pacchapuquiopampa, Quebrada Victoria y la Qda. Ayamachay la pendiente se presenta más pronunciada, aproximadamente entre 40% y 60%.

#### 2.2.6.1.2 Cerros y zonas de escarpas

Esta zona, tiene pendientes mayores de 45°, está constituida por zonas de escarpas y probablemente controlada por una falla longitudinal a lo largo de la Qda Andaychagua. La litología de este tipo de afloramiento corresponde a los volcánicos del Grupo Mitu y a las filitas del Grupo Excélsior en el área de Andaychagua además de las calizas del Grupo Pucará resistentes a la erosión, en los volcánicos del Grupo Mitu se aprecia roca desnuda generalmente sin suelo, con acumulación de materiales coluviales a lo largo de las faldas de los cerros en la margen derecha de la Qda. Ayamachay.

#### 2.2.6.1.3 Zona de bofedales

Las mayores extensiones de bofedales, se presentan en la cabecera y en la parte intermedia de las Qdas. Andaychagua y Pacchapuqiopampa y abarcan la base del valle con extensiones de aproximadamente 25 a 30 hectáreas en total. Por su parte en San Cristóbal, las mayores extensiones de bofedales, se presentan en la parte intermedia de la Qda. Ayamachay y en los humedales del Tajo Gavilán, ubicada en la parte alta de la margen derecha de la Qda. Ayamachay pero en extensión son mucho menores que los existentes en la quebrada Andaychagua (5 a 7 hectáreas).

Estas áreas generalmente están formadas por material limo arcilloso, que influye en la retención de agua de precipitación, y la vegetación se mantiene verde mayormente durante la época de lluvia, y en la época de estiaje la vegetación prácticamente se seca.

#### 2.2.6.2 Litología y estratigrafía

En los alrededores del área de estudio se observan un conjunto de unidades litológicas cuyas edades van desde el Paleozoico inferior hasta el cuaternario, ver plano TES-PTI-2015-IB-003. A continuación se describen los grupos y formaciones geológicas:

##### 2.2.6.2.1 Grupo Excélsior (silúrico devónico)

Representan las rocas más antiguas aflorantes en el área y conforman el núcleo del Domo de Yauli. La potencia total de este grupo es desconocida, sin embargo J. Harrison (1943), determinó una potencia de 1,800 metros para una secuencia equivalente en los alrededores de Tarma.

En San Cristóbal las pizarras son de color gris a negro y localmente son conocidas como filitas. Las filitas están fuertemente dislocadas y contienen numerosos lentes de cuarzo, los que han sido interpretados como el resultado

del metamorfismo regional. Las filitas ocurren finamente estratificadas, mientras que los lentes de cuarzo presentan mayor espesor generalmente en los núcleos de anticlinales. Al Sureste de San Cristóbal las filitas contienen algunos horizontes no muy potentes de calizas metamorfizadas a mármol. En base a los pocos fósiles encontrados las series Excélsior han sido determinadas como de edad Devoniana o más antigua.

#### 2.2.6.2.2 Grupo mitu (pérmico)

Las rocas del grupo Mitu yacen discordantemente sobre las filitas Excélsior, cuyo grupo está constituido principalmente por sedimentos continentales de color rojo tales como conglomerados y brechas volcánicas. Localmente han sido encontradas algunas calizas. El grupo Mitu está ausente alrededor de San Cristóbal pero a pocos kilómetros al Norte, en la mina Carahuacra, estos sedimentos han sido encontrados tanto en superficie como en el interior de la mina.

##### 2.2.6.2.2.1 Volcánicos catalina

En realidad esta unidad constituye la parte superior del grupo Mitu. En los alrededores del Domo de Yauli estos volcánicos yacen sobre el grupo Mitu y sobre las filitas Excélsior en donde el Mitu está ausente. A lo largo del extremo Oeste del Anticlinal de Chumpe, en Carahuacra y San Cristóbal, los

volcánicos Catalina consisten de derrames andesíticos variando en composición desde dacitas a andesitas, mientras que más hacia el Este cerca de Andaychagua están compuestos de una serie de aglomerados irregulares y brechas piroclásticas que cambian gradualmente también a derrames andesíticos. Dentro de la volcánica Catalina ocurren también lutitas oscuras. Debido a la naturaleza irregular de los volcánicos la potencia total del grupo Mitu y de los volcánicos Catalina es muy variable. Al Este de San Cristóbal la potencia de los volcánicos Catalina es alrededor de 800 metros. La edad, tanto del Mitu como de los volcánicos Catalina fue considerada como del Carbonífero superior (McLaughlin 1940) y posteriormente asignada al Pérmico.

#### 2.2.6.2.3 Grupo pucara (jurásico)

Este grupo yace discordantemente ya sea sobre los sedimentos del Mitu o sobre la volcánica Catalina. Alrededor de La Oroya la potencia del grupo Pucará ha sido determinada en más de 1,400 metros (J. Y. Harrison, 1943), hacia el lado Este del anticlinal de Chumpe, las calizas contienen algunos derrames basálticos en su base, los mismos que no ocurren en el flanco Oeste del mismo. Aquí, en lugar de basaltos, se encuentran calizas conteniendo nódulos de cuarzo de más o menos 20 centímetros de diámetro. Encima de este horizonte las calizas están finamente estratificadas siendo en parte lutáceas y conteniendo algunas capas de tufos que varían en espesor de 10

centímetros a 3 metros. La edad de las calizas ha sido determinada como liásicos habiendo sido correlacionada con la formación Aramachay.

#### 2.2.6.2.4 Grupo goyllarisquizga (cretáceo)

Sobre las calizas Pucará yacen en aparente conformidad las areniscas Goyllarisquizga. Este grupo consiste de areniscas de color bruno amarillento, localmente con apariencia cuarcítica. En San Cristóbal la potencia de esta formación alcanza a los 100 metros. Esta formación ha sido atribuida al Cretácico inferior, Valanginiano-Aptiano (McLaughlin 1924). Ver Figura 02.



Figura 02 Vista Panorámica del Grupo Gollarisquizga

### 2.2.6.3 Formación chulec, pariatambo y jumasha (cretáceo)

Estas formaciones tienen características litológicas, faunísticas y posición estratigráfica similares a las que presentan en la zona occidental de la cuenca del Cretáceo; sin embargo su grosor es más reducido y con ligeras variaciones litológicas. Estas secuencias calcáreas cretáceas están expuestas formando parte de las estructuras del norte de Morococha del suroeste del anticlinal de Morococha; del oeste del anticlinal de Chumpe con extensión de afloramientos hasta la Divisoria Continental de Ticlio y noroeste de esta localidad, así como de las estructuras de los nevados de Huallacancha y Colquepucro, donde las formaciones no han sido separadas.

Al suroeste de la laguna Huayllaycocha, se observan caliza gris a marrón claro en capas medianas, con algunas intercalaciones de caliza margosa y lutita gris parda (Formación Chúlec). Yace en discordancia sobre las areniscas del Grupo Goyllarisquizga.

#### 2.2.6.3.1 Rocas intrusivas

En las áreas de Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua ocurren 2 tipos de intrusivos: Intrusivos ácidos y básicos.

#### 2.2.6.3.2 Intrusivos ácidos

Las rocas intrusivas ácidas están representadas en el área por stocks de monzonita cuarcífera y diques de alaskita ubicados a lo largo o cerca de la zona axial del anticlinal de Chumpe. Los stocks más importantes en el área son: el intrusivo de Carahuacra y el intrusivo de Chumpe. El primero es un stock de 1.5 por 1 kilómetro que aflora en el límite NO del área de San Cristóbal, en contacto con las filitas del grupo Excélsior y los volcánicos Catalina. El intrusivo de Chumpe conforma el pico más alto en el área de San Cristóbal y se ubica a lo largo de la zona axial del anticlinal que lleva sus nombres. Una serie de diques irregulares, paralelos y con buzamientos verticales, conocidos localmente como "diques de alaskita", se encuentran intruyendo filitas del grupo Excélsior a lo largo de la zona axial del anticlinal de Chumpe. Estos diques parecen estar conectados en profundidad con el intrusivo de Chumpe. Petrográficamente los diques son granitos pórfidos.

#### 2.2.6.3.3 Intrusivos básicos

Los intrusivos de carácter básico han sido encontrados cerca del intrusivo de Carahuacra y en el área de Andaychagua. Los que se encuentran cerca al intrusivo de Carahuacra son diques de diabasa que se ubican casi perpendicularmente al eje del anticlinal. En Andaychagua, dentro de la volcánica Catalina, ocurre una intrusión de gabro tipo chimenea de forma

elipsoidal. Su tamaño es de 70 x 250 metros. De este conducto se desprenden diques de pocos metros de potencia que atraviesan los volcánicos. (Estos diques son de naturaleza ácida y parecen haberse derivado del gabro en mención) Cerca a la veta Andaychagua estos diques están fuertemente alterados por lo que su identificación exacta no ha sido determinada.

#### 2.2.6.4 Depósitos cuaternarios

Estos depósitos constituyen el material de cobertura generalmente no consolidado, distribuido irregularmente en la zona; estos se han acumulado como resultado de procesos glaciares, fluvio-glaciares, coluviales y en algunos casos por fenómenos de movimientos de masa. Estos depósitos, forman depósitos de pendiente suave y cubren a las rocas sedimentarias y en los valles adyacentes se encuentran como aluviales y/o escombros de talud.

En la parte alta de la Cordillera Occidental, así como en el Flanco Occidental Andino yacen los siguientes depósitos cuaternarios que se detallan a continuación:

##### 2.2.6.4.1 Depósitos glaciares

Comprende a los depósitos morrénicos antiguos a recientes que se encuentran en las cabeceras de los valles glaciares o bien cubriendo el fondo o márgenes de los mismos hasta una altitud de 4200 msnm.

#### 2.2.6.4.2 Depósitos fluvioglaciares

Corresponde al material acarreado por los ríos de ambas vertientes de la zona andina; esto guarda relación con el proceso erosivo activado por el sensible levantamiento andino y las etapas de glaciación. Se han formado terrazas de material aluvional en las márgenes de los ríos, las más recientes junto al lecho; en algunos casos se han producido inundaciones que han permitido la formación de depósitos fangosos (bofedales).

#### 2.2.6.4.3 Depósitos coluviales y de deslizamiento

Los primeros son los depósitos que se encuentran al pie de las escarpas de las laderas de los cerros como material de escombros constituidos por gravas y bloques sub-angulosos con matriz areniscosa y limosa.

#### 2.2.6.5 Marco estructural

Los afloramientos de la zona de estudio presenta fuerzas comprensivas de dirección E-W que se originaron durante el Cretáceo (Plegamiento "Peruano"), comenzaron a formar el anticlinal Morococha, que tiene una orientación NW – SE, y forma una ventana estructural con exposición del basamento paleozoico, mesozoico y cenozoico; perturbado por las diferentes orogenias e intrusivos generando un área estructuralmente compleja, la

misma que llevó a esta zona a convertirse en una de las áreas más propicias para el desarrollo de varios yacimientos de depósitos minerales como vetas, mantos, cuerpos de reemplazamiento y mineralización.

Estructuralmente las unidades Carahuacra y San Cristóbal se encuentran afectados por plegamientos y fallamientos, los cuales han ocasionado la formación de anticlinales y sinclinales, originando el fracturamiento y reordenamiento de la estructura original de las unidades rocosas, causando fracturas y diaclasas que a su vez han generado una porosidad secundaria, lo cual es un elemento importante para la geomecánica e hidrogeología por ocasionar aumento en la permeabilidad de las rocas originarias. A continuación se describen algunas estructuras:

#### 2.2.6.5.1 Plegamiento

Dentro del Domo de Yauli fueron formados 3 anticlinales paralelos. Los ejes de estos anticlinales tienen un rumbo entre N 35° - 40°O. El anticlinal que está más al Oeste de los tres es el anticlinal de Chumpe, el cual está directamente relacionado a la mineralización del distrito de Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua. Su mayor dimensión que es de NO á SE tiene alrededor de 16 kilómetros mientras que de NE a SO tiene 4 kilómetros. El flanco Occidental tiene un buzamiento de 55° al SO, mientras que el flanco Oriental tiene un buzamiento de 30° al NE. El núcleo del anticlinal de

Chumpe está formado por las filitas Excélsior y el grupo Mitu del Paleozoico. El flanco Occidental está compuesto por calizas Pucará y areniscas Goyllarisquizga, mientras que en el flanco Oriental se extienden los volcánicos Catalina por varios kilómetros al Este (ver figura 03).

El anticlinal de Chumpe debe ser considerado como el extremo sureste del Domo de Yauli, donde la mayor acción del plegamiento ha tenido lugar; en esta área las pizarras del grupo Excélsior del Paleozoico han sido levantadas en su mayor extensión.



Figura 03: Vista del Pliegue en el Pucará

#### 2.2.6.5.2 Fracturamiento

Todo el fracturamiento en el área de Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua es el resultado de las mismas fuerzas compresivas que dieron lugar al arqueamiento del domo de Yauli. Alrededor y dentro del anticlinal de Chumpe se distinguen tres conjuntos de sistemas de fracturamiento (información extraída de la geología del Túnel Victoria):

- El primer sistema con mayor presencia (80%) tiene rumbo de Noreste a Suroeste y buza gran parte al Noroeste.
- El segundo sistema (15%) tiene rumbo de Este a Oeste y buza al Norte y otros al Sur.
- El tercer sistema (5%) tiene rumbo Noroeste a Sureste. Algunos buzan al Noreste y otros al Suroeste.

#### 2.2.6.5.3 Fracturamiento y fallamiento paralelo al eje del anticlinal

Durante la formación del anticlinal de Chumpe, producido por fuerzas compresivas, los estratos inferiores de caliza resbalaron sobre los volcánicos subyacentes, dando lugar a la formación de pequeñas y repetidas fallas inversas acompañadas de pliegues de arrastre. El sobre-escurrimiento y fallas inversas encontradas al Oeste de San Cristóbal en las calizas del grupo Pucará pueden pertenecer a este sistema.

Al cesar las fuerzas compresivas, probablemente se produjeron fuerzas tensionales en dirección contraria a la que actuaban las fuerzas compresivas. Estas fuerzas de tensión así generadas dieron lugar a la formación de fracturas longitudinales al eje del anticlinal de Chumpe, las cuales fueron posteriormente rellenadas por los intrusivos, originando los diques de alaskita que ocurren en el núcleo de dicho anticlinal.

#### 2.2.6.5.4 Fracturamiento perpendicular al eje del anticlinal

Posterior a la formación de las fracturas paralelas al eje se formaron sistemas de fracturas de tensión más o menos perpendiculares al eje de este anticlinal y limitadas fracturas de cizallamiento. Las fracturas de tensión perpendiculares al eje del anticlinal se distribuyen a uno y otro lado del intrusivo Chumpe y atraviesan las rocas que constituyen esta estructura en dirección Noreste-Suroeste. Corresponden al primer sistema anotados líneas arriba. En el lado Norte del intrusivo Chumpe las fracturas tienen un buzamiento de  $50^{\circ}$  -  $70^{\circ}$  en general hacia el Sur, mientras que las que se ubican al Sur del mismo intrusivo poseen buzamientos de  $50^{\circ}$  -  $85^{\circ}$  hacia el Norte.

La tensión, causa del fracturamiento principal en las áreas de Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua parece haber sido ocasionada por efecto del arqueamiento del eje del anticlinal, el cual probablemente se produjo por la acción de fuerzas compresivas que actuaron en direcciones Noreste-Suroeste,

acompañadas por el empuje de abajo hacia arriba durante el emplazamiento del intrusivo Chumpe.

Otra teoría que podría aplicarse a la formación de estas fracturas sería la que considera el fracturamiento transversal al eje del anticlinal de Chumpe como formado por esfuerzos tensionales y de cizallamiento originando indistintamente fracturas de tensión y de cizalla en relación a los diferentes tipos de roca que conforman el mencionado anticlinal; así en los volcánicos que conforman el flanco occidental predominarían las fracturas de tensión, las de cizalla en el núcleo y nuevamente las de tensión en el flanco oriental.

Movimientos normales acompañados de subordinados movimientos rotacionales ocurrieron después de la formación de las fracturas tensionales, lo cual puede ser comprobado por el desplazamiento que presentan los diques y algunas vetas por efecto del movimiento a lo largo de la fracturas.

El bandeamientos que presentan algunas vetas y los diferentes tipos de alteración sugieren que las vetas han sido reabiertas y cerradas varias veces durante su historia. Las reaperturas de las vetas podrían estar en relación con los varios movimientos rotacionales ocurridos a lo largo de la falla. El último movimiento probablemente ocurrió después de emplazada la primera mineralización y dio lugar a una zona de panizo que se encuentra a lo largo de algunas vetas y fracturas. El movimiento entre las diferentes etapas de mineralización está probado por el extenso brecha miento de esfalerita, de la

siderita, en algunas partes y el relleno de fracturas a través de la veta por carbonatos posteriores.

### **2.2.7 Geología local**

El Proyecto Túnel de integración, inicia en la mina Carahuacra cuya cota piso es de 4200 msnm y finaliza en la mina Andaychagua cruzando la mina San Cristóbal. El eje del Túnel tiene una orientación Noreste y el perfil siguiendo el eje del Túnel tiene una pendiente de 0.3% en promedio.

El área del proyecto está en la estructura regional conocida como domo Yauli, rocas volcánicas y metamórficas. La roca que conforma el trazo del túnel son dos rocas bien definidas: volcánica y metamórficas las filitas. En superficie la roca predominante es la caliza, está se encuentra emplaza sobre el volcánico, la cual se encuentra moderadamente fracturada y ligeramente meteorizada, con cobertura de material coluvial de espesores variables.

Las geoestructuras del medio geológico están limitadas a pequeñas fallas y diaclasas. Las discontinuidades (diaclasas) tienen rumbo Oeste-Este y sus buzamientos son verticales. El espaciamiento de las juntas varía entre 20 y 60 cm, lo que le da al macizo rocoso una estructura de bloques de tamaño mediano.

La información recopilada de la geología de superficie está relacionada con la geología del Túnel Victoria y el Xc 810, para un mejor entendimiento revisar el plano TES-PTI-2015-IB-001.

#### 2.2.7.1 Geomorfología local

Está constituida por típicos valles glaciares en forma de U que discurren en dirección NW y SE controladas por las estructuras de rumbo andino, con un relieve suave y moderado y con pendientes mayormente menores a 30 % en el sector noroeste que corresponden a las cabeceras de las quebradas; en algunos sectores como en la parte intermedia de la Qda. Andaychagua, las quebradas de los sectores como en la Qda. Pacchapuquiopampa, Quebrada Victoria y la Qda. Ayamachay la pendiente se presenta más pronunciada, aproximadamente entre 40% y 60%.

Su relieve es abrupto y empinado entre los 3,500 y los 4,500 msnm, presenta desfiladeros rocosos con cumbres afiladas, producto de la erosión glacial pasada. En esta zona el clima es bastante frío húmedo y nublado. Las temperaturas presentan grandes oscilaciones térmicas entre el día y la noche, y las precipitaciones son abundantes.

### 2.2.7.2 Litología y estratigrafía

En esta sección se presentan las características geológicas dominantes del Proyecto Túnel de Integración. La importancia del tema geológico radica principalmente en su influencia sobre las condiciones Litológicas, geomecánicas e hidrogeológicas que afecten al proyecto, teniendo en cuenta que el conocimiento de la geología local permite evaluar la naturaleza de las formaciones rocosas donde se realizará la exploración y asimismo las formaciones geológicas facilitarán o no el paso del agua subterránea de acuerdo a su litología y composición física. En el plano de Geológico Local, se pueden observar los rasgos geológicos de la zona de estudio. A continuación se describen las unidades geológicas que atraviesa el túnel:

#### 2.2.7.2.1 Grupo Excélsior

Esta unidad geológica aflora en la parte Central y Oeste del área, la cual corresponde mayormente a las minas San Cristóbal, Andaychagua y Carahuacra, esta unidad geológica está compuesta por filitas generalmente con bajo grado de fracturamiento presentando venillas de cuarzo, venillas de piritas, material arcilloso compacto (roca blanda), la oxidación no es abundante en esta unidad geológica, en algunos tramos presenta un alto grado de fracturamiento, ver figura 04.



Figura 04: Vista de las Filitas del Excélsior

#### 2.2.7.2.2 Metavolcanicos

Esta unidad corresponde a una secuencia de transición entre el Grupo Excélsior y el Grupo Mitu, consiste en secuencias volcánicas que han sufrido metamorfismo de bajo grado, presentan textura brechoide, débil a moderado fracturamiento, intenso venilleo de calcita, y ligera mineralización de sulfuros.

#### 2.2.7.2.3 Grupo Mitu

Localmente el grupo Mitu consiste de volcánicos andesíticos, presenta zonas de grado variable de fracturamiento, en las zonas con fracturamiento de alto grado se observa estructuras mineralizadas, en las de grado moderado se puede observar venillas y cavidades mineralizadas con sulfuros además de una fuerte presencia de óxidos mientras que en los tramos con bajo grado de fracturamiento la andesita presenta zonas con una textura brechada, en la cual

se puede observar abundantes venillas mineralizadas con sulfuros, venillas de calcita y algunos niveles arcillosos pero con poca presencia de óxidos, ver Figura 05.



Figura 05: Roca del Mitu – Continental

#### 2.2.7.2.4 Grupo Pucará

Esta unidad está compuesta de calizas, presentando un fracturamiento de moderado a alto grado, las zonas donde el fracturamiento es moderado se encuentra relleno con venillas de calcita y escasa oxidación, mientras que en las zonas con alto grado de fracturamiento se puede observar parte de la alteración hidrotermal (argilización) que ha sufrido la roca, en esta parte la calcita muestra un color gris oscuro con venillas de calcita, alternan ocasionalmente con unidades de lutitas gris violáceas y rojizas,

moderadamente fracturadas. En su mayoría moderado, en la fracturas se observa sulfuros diseminados con presencia de venillas de sílice.



Figura 06: Roca del grupo Pucará

#### 2.2.7.2.5 Grupo Goyllarisquizga

Consiste en areniscas cuarcíticas blanquecinas con intercalación de lutitas y limolitas rojizas en la base y con areniscas calcáreas y lutitas grises en la parte superior, el grado de fracturamiento es en su mayoría moderado, en la fracturas se observa sulfuros diseminados con presencia de venillas de sílice.

#### 2.2.7.2.6 Rocas intrusivas

Se ha encontrado microdioritas de textura fanerítica verde parduzco, poco a moderadamente fracturada, con venas de calcita oquerosa con óxidos de hierro y venillas de cuarzo.

#### 2.2.7.2.7 Depósitos cuaternarios

Corresponden a depósitos glaciares morrénicos y depósitos fluvioglaciares como consecuencia de la erosión glacial antigua y reciente, en el área se observan bloques de hasta 4 m de diámetro y cantos en matriz areno-limosa pardo oscuro, con una potencia de hasta 40m.



Figura 07: Frente Fracturas del Túnel Victoria

El grado de resistencia de la roca se puede considerar entre R3 y R4 es decir entre roca medianamente dura y roca dura.



Figura 08: Vetillas de cuarzo

El análisis de la litología y el aspecto estructural del túnel Victoria y Xc 810, ayuda a definir el comportamiento competente de las rocas volcánicas e intrusivas a lo largo de una franja de volcánico desde el contacto volcánico-caliza-filitas. Siendo el contacto volcánico-caliza-filitas de carácter regional que llega hasta el norte de la unidad Minera, se asume que durante el plegamiento de las unidades litológicas, los efectos sobre la franja cercana al techo del volcánico fueron parecidos.

### **2.2.8 Yacimientos minerales**

Es importante tener en cuenta la distribución y comportamiento de las principales vetas desde el punto de vista estructural y de las alteraciones hidrotermales de sus rocas encajonantes tendrán incidencia para el mayor o menor grado de sostenimiento durante la ejecución del Proyecto Túnel de Integración.

#### 2.2.8.1 Yacimientos del distrito

La mineralización en las minas Carahuacra y San Cristóbal Andaychagua se presentan en dos tipos: como relleno de fracturas que cruzan el anticlinal de Chumpe (vetas), y como reemplazamiento de las calizas Pucará, encima de los volcánicos Catalina (mantos). En Andaychagua solo como vetas.

#### 2.2.8.2 Mineralización en vetas

El anticlinal de Chumpe es extensamente atravesado por fracturas perpendiculares a su eje, prolongándose algunas desde el flanco occidental hasta el flanco oriental del anticlinal, mientras que otras ocurren sólo en los flancos.

Alguna de estas fracturas han sido mineralizadas en mayor o menor grado, pero solo unas pocas contienen mineralización económicamente explotable. Son importantes estructuralmente las vetas principales del distrito como la veta 658, 722, 755, San Cristóbal y Andaychagua.

##### 2.2.8.2.1 Veta San Cristóbal

La veta San Cristóbal es la estructura más extensa que se conoce en el área y ha sido mineralizada a lo largo de 3 kilómetros. El movimiento principal de toda la estructura ha sido normal con un desplazamiento de aproximadamente

200 metros. Además, por acción rotacional la caja piso de la veta ha tenido un movimiento en el sentido de las agujas del reloj comparado con la caja techo de la veta. Aunque la estructura consta de una fractura continua, su rumbo cambia en relación al tipo de roca, debido probablemente a su naturaleza (tensión o de cizalla) o en su defecto debido a una refracción de la fractura al entrar en diferente tipo de roca. En los volcánicos del flanco Occidental el rumbo es de NE 60°-70°SO. El buzamiento de la veta a lo largo de toda su extensión varía de 45° á 60°SE. El ancho varía fuertemente a lo largo de toda su extensión. Estas potencias tan variables podrían reflejar las competencias variables de las rocas y los diferentes orígenes de las fracturas.

a) Alteración de las Rocas Encajonantes

La alteración de las rocas encajonantes varía de acuerdo al tipo de roca y de mineralización. En las filitas, la alteración consiste, de la veta hacia afuera, de una zona de silicificación, de caolinización y/o sericitización y finalmente cloritización. Diseminación de pirita ocurre entremezclada con todos los tipos de alteración. En los volcánicos, la zona de silicificación es reducido y la zona de caolinización alcanza escasos metros, mientras que la zona de cloritización hacia el contacto con las filitas decenas de metros.

## b) Controles de Mineralización

La mineralización en la veta San Cristóbal tiene un control estructural y litológico. El control estructural está determinado por la falla San Cristóbal que permitió la circulación de soluciones mineralizantes; y además, las diferentes reaperturas, durante la formación de la veta, dieron lugar a las diferentes bandas de minerales. El control litológico está determinado por los diferentes tipos de rocas encajonantes a lo largo de la veta San Cristóbal, los cuales probablemente han influido en la distribución espacial de los minerales.

### 2.2.8.2.2 Veta Andaychagua

La veta Andaychagua es la segunda estructura en orden de extensión conocida en el área. Su longitud es alrededor de 5 kilómetros, la estructura tiene un rumbo promedio de N 30°E y buzamiento entre 80° a 90° N. En el flanco oriental del anticlinal de Chumpe, aflora un intrusivo de gabro de forma cilíndrica casi vertical, que ha sido cortado y desplazado horizontalmente por la estructura Andaychagua. A partir de esta intrusión se notan diques de poca potencia que corren paralelos y dentro de la veta Andaychagua.

### c) Alteración de las Rocas Encajonantes

La alteración de las rocas encajonantes de la veta Andaychagua difiere de la alteración de la veta San Cristóbal, probablemente porque los volcánicos en Andaychagua son de diferente composición. Aquí los volcánicos consisten de brechas piroclásticas y aglomerados que gradualmente cambian a derrames andesíticos. Las alteraciones son silicificación, caolinización y sericitización y un halo exterior de cloritización.

#### 2.2.8.2.3 Sistema de vetas Virginia

El sistema de vetas Virginia consiste de algunas fracturas de tensión mineralizadas paralelas y a 1 kilómetro al Norte de la veta San Cristóbal. Estas fracturas ocurren en el flanco Occidental del anticlinal de Chumpe, donde éstas atraviesan toda el área de los volcánicos desde el contacto con las calizas hasta el contacto con filitas. En las calizas las fracturas continúan por una distancia corta y terminan en una serie de ramificaciones.

Como parte del sistema Virginia, tenemos las vetas 658, 722 y 755 considerada una de las más importantes. Esta veta tiene una longitud

aproximada de un kilómetro (500m. en volcánico). El rumbo de la veta varía entre NE 50° - 70°SO y su buzamiento entre 55° y 65° SE.

d) Alteración de la Roca Encajonante

La alteración de la roca encajonante varía de acuerdo a la potencia de la mineralización presente. Los volcánicos presentan fuerte silicificación cerca a la veta. Un poco más alejado de la veta se presenta de moderada a fuerte caolinización, y finalmente ligera cloritización con algo de piritización.

e) Controles de Mineralización

Dos rasgos fundamentales han controlado el movimiento de las soluciones mineralizantes en la zona de Virginia siendo ellos principalmente de carácter estructural. El primer rasgo estructural es la presencia de fracturas de tensión en los volcánicos, las que fueron posteriormente rellenadas con sulfuros. El segundo rasgo estructural lo constituyen los contactos: volcánicos-caliza, volcánicos-filitas, y las diferentes intersecciones de las vetas. Estos controles estructurales parecen que han sido decisivos en la localización de las masas mineralizadas a lo largo de las vetas de Virginia.

### 2.3 GEOMECANICA

El presente estudio tiene el objetivo de desarrollar el estudio a nivel de ingeniería de factibilidad del Proyecto Túnel de Integración de la Compañía Minera VÓLCAN S.A.A., cuya finalidad es optimizar la extracción del mineral explotado en las unidades Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua a mediano plazo y en el largo plazo garantizando la sostenibilidad de la operación subterránea ante un eventual incremento de la producción. En este contexto se ha realizado un análisis de la caracterización geomecánica del actual Túnel Victoria y del Crucero 810, esto inicialmente conceptualizado implicaba la realización de todo un programa de investigaciones “geológicas, hidrogeológicas, geomecánicas, prospección geofísica, desarrollo de sondajes orientados en el eje del proyecto, ensayos in-situ (fracturamiento, permeabilidad, etc.) en campo e investigaciones de “Mecánica de Rocas y Mecánica de Suelos” en laboratorios especializados que permitan el desarrollo adecuado de los estudios de la Ingeniería.

Posteriormente, debido a la horizontalidad y la cercanía del Túnel de Integración respecto al actual Túnel Victoria y a la superposición con el Xc 810 se modificó los alcances y los programas de investigaciones de campo y laboratorio reduciéndose dicho informe a los datos tomados en campo durante su construcción y así poder estimar las condiciones geomecánicas del terreno (arreglo estructural y calidad de masa rocosa), estimar parámetros de

resistencia a nivel de “roca intacta, discontinuidades y masa rocosa”, evaluar las condiciones del agua subterránea con énfasis en su influencia en la estabilidad de excavaciones y evaluar el estado tensional (conceptual). El desarrollo, los resultados, las conclusiones y recomendaciones de estas evaluaciones se presentan en éste informe.

### **2.3.1 Objetivos y alcances**

El objetivo principal de esta evaluación es caracterizar la masa rocosa que involucra el túnel de integración y su entorno físico. Esto implica establecer el arreglo estructural, la calidad de roca, los parámetros de resistencia, la influencia del agua subterránea en la estabilidad de excavaciones, estimar el estado tensional, establecer recomendaciones básicas sobre los controles técnicos que deberán implementarse para lograr una gestión adecuada de los aspectos geomecánicos asociados al proyecto Túnel de integración. Para cumplir con el objetivo de esta evaluación, se han desarrollado los siguientes alcances:

- ❖ Recopilar información existente (topografía superficial y subterránea).
- ❖ Recopilar el mapeo geomecánico realizado en el túnel victoria y el crucero 810.
- ❖ Tomar los ensayos de campo realizados y tomar como base todas las estructuras geológicas del plano TES-PTI-2015-IB-012 para obtener resultado con la ayuda de los softwares de ingeniería.

- ❖ Establecer los dominios en base a la información geológica proporcionada.
- ❖ Caracterizar y zonificar la masa rocosa en los distintos dominios geomecánicos.
- ❖ Elaboración del modelo geomecánico conceptual en planos de planta y perfiles transversales al eje del Túnel Victoria y Xc 810.
- ❖ Estimar los parámetros de resistencia y mostrar los escenarios más desfavorables del macizo.

### **2.3.2 Enfoque de evaluación**

Para cumplir con el objetivo y los alcances, establecidos en el acápite 2.3.1, se ha sub-dividido la evaluación en dos etapas que se resumen líneas abajo.

#### **2.3.2.1 Etapa I**

Orientada a la ejecución de investigaciones básicas y recopilación de información relacionada al mapeo geomecánico de superficie y excavaciones subterráneas, ensayos de campo y laboratorio para obtener información de interés que permitan evaluar con mayor énfasis los principales factores que controlan la estabilidad de la masa rocosa a nivel de dominios geomecánicos.

### 2.3.2.2 Etapa II

Integrar la información obtenida en las investigaciones básicas con la finalidad de establecer el arreglo estructural de la masa rocosa, clasificar la masa rocosa a través de un índice numérico, definir los dominios geomecánicos, asignar parámetros de resistencia a los dominios geomecánicos, establecer el modelo geomecánico conceptual, estimar el estado tensional, evaluar los modos probables de inestabilidad asociados al arreglo estructural existente en la masa rocosa que involucra el Proyecto.

Finalmente como corolario de esta evaluación se establecerán recomendaciones que permitan incorporar herramientas para una gestión adecuada de los aspectos geomecánicos (controles operacionales) y llevar a cabo operaciones en condiciones de seguridad y eficiencia.

## 2.3.3 Aspectos técnicos desarrollados

### 2.3.3.1 Investigaciones básicas

Investigaciones geomecánicas de campo y laboratorio, las cuales están orientadas principalmente a establecer los siguientes aspectos:

- Determinar la distribución espacial de los principales sistemas de discontinuidades estructurales (fallas y diaclasas).

- Clasificar la masa rocosa, utilizando formatos de registro geológico-geomecánico, según protocolos sugeridos por la I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics) mediante la aplicación del criterio de Clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski, modificada por Romana 2000.
- Zonificar la masa rocosa en áreas de interés, estableciendo los dominios geomecánicos en base a información desarrollada en las investigaciones de campo y ensayos de mecánica de rocas en laboratorio.
- Estimar y asignar los parámetros de resistencia a cada uno de los dominios geomecánicos conceptuados en base a información obtenida de la clasificación geomecánica, ensayos de campo y laboratorio mediante aproximaciones empíricas (criterios de rotura y correlaciones entre las clasificaciones geomecánicas y los módulos elásticos).
- Elaboración del modelo geomecánico conceptual en planos de planta y secciones transversales al eje del Túnel.
- Evaluación conceptual del estado tensional en la masa rocosa que involucra el desarrollo del Proyecto.

#### 2.3.3.2 Actividades realizadas

Dentro el abanico de actividades realizadas para los propósitos de esta evaluación geomecánica se han realizado investigaciones en “campo, laboratorio y gabinete” como se describe en los siguientes acápite.

### 2.3.3.3 Actividades de campo

Para entender el comportamiento actual del macizo rocoso, he realizado visitas de inspección con otros colegas y especialistas de la rama, de manera que pueda entender su apreciación respecto al comportamiento de la excavación realizada (Túnel Victoria y Xc 810). Para esto he realizado lo siguiente:

- Reconocimiento litológico-estructural de superficie.
- Mapeo geomecánico en afloramientos rocosos de superficie y excavaciones subterráneas.
- Ensayos de campo (resistencia a la compresión uniaxial con el martillo de rebote y picota de geólogo, estimación del coeficiente de rugosidad de juntas JRC).
- Muestreo, selección y definición de los tipos de ensayos a realizarse sobre cada uno de los bloques rocosos en el laboratorio de Mecánica de rocas.
- Recopilación de información proporcionada por colegas especialistas en el campo (planos topográficos, geológicos) para propósitos del informe.

#### 2.3.3.4 Actividades de laboratorio

Las actividades de laboratorio, fueron: selección, muestreo, recopilación, clasificación, embarque y especificaciones sobre los tipos de ensayo a realizarse por muestra. Los trabajos del tratamiento de muestras, protocolos de ensayos y elaboración de los reportes de ensayos fueron tercerizados al laboratorio de mecánica de rocas de la universidad nacional de ingeniería. Dichos ensayo fueron los siguientes:

- Ensayo de Propiedades físicas.
- Ensayo de Compresión simple.
- Ensayo de Corte directo.
- Ensayo de Tracción indirecta.
- Ensayo de Módulos elásticos.
- Ensayo de Compresión triaxial.

#### 2.3.3.5 Actividades de gabinete

Los trabajos de gabinete comprenden todas aquellas actividades realizadas con la finalidad de obtener los resultados finales (proceso, análisis,

interpretación, elaboración de reportes, edición del informe) entre estas actividades podemos citar:

- Revisión de la información disponible (topografía, geología).
- Proceso, análisis e interpretación de la información (información histórica e información obtenida en investigaciones de campo y ensayos de mecánica de rocas en laboratorio”.
- Clasificación geomecánica de la masa rocosa en “Dominios geomecánicos”.
- Estimación y definición de los parámetros de resistencia a cada uno de los dominios geomecánicos.
- Evaluación conceptual del estado tensional en la masa rocosa (esfuerzos pre-minado).
- Establecimiento de recomendaciones.
- Elaboración del informe.

#### **2.3.4 Análisis geomecánico**

Como se precisa en el acápite 2.3.1, el alcance de esta evaluación es caracterizar la masa rocosa que involucra el Túnel Victoria & Xc 810 y su entorno físico con la finalidad de conceptualizar el modelo geomecánico asociado al proyecto Túnel de Integración. La información topográfica (superficial y subterránea) proporcionada por el área de ingeniería ha servido para ubicar al proyecto en el espacio. Esta información (planos digitales)

muestra una superficie topográfica con curvas de nivel detalladas al metro y se encuentran procesadas en el sistema de coordenadas UTM-PSAD56; considerando las escalas de trabajo (1/10000, 1/5000, 1/1000, 1/500) para los propósitos de este informe en el área de interés se trabajará con esta información topográfica.

Adicionalmente a esta información he considerado la evaluación geológica del túnel victoria y del crucero 810 (el cual se tomará como información referencial para los cálculos).

#### 2.3.4.1 Análisis geomecánico de campo

He analizó las estructuras geológicas de campo, los mapeos geomecánicos del Túnel Victoria y Xc 810, considerada como parte esencial para propósitos del informe, la orientación para evaluar la masa rocosa fue través del mapeo geomecánico en afloramientos rocosos de superficie, mapeo geomecánico en labores subterráneas y ensayos de campo en el Túnel Victoria y Xc 810 del Nivel 820. También se ha tomado la data de los mapeos de cruceros realizados desde el Túnel Victoria hacia el contacto con rocas calcáreas (dirección SW-W) y la auscultación de algunos niveles inferiores (Nv.920, Nv.1020) en las cuales por su inaccesibilidad fue imposible realizar trabajos de mapeo geomecánico detallados limitándonos en estos sectores a realizar valoraciones puntuales según el índice de resistencia geológica.

#### 2.3.4.2 Mapeo geomecánico en superficie

Esta evaluación ha sido realizada al NW-W de la Bocamina Túnel Victoria en el área ubicada adyacente a la Planta Concentradora Victoria (talud rocoso ubicado en la parte alta), con la finalidad de caracterizar la masa rocosa a través de un índice numérico cuantitativo que permita discretizar la masa rocosa en sub-unidades tipificadas como dominios geomecánicos.

#### 2.3.4.3 Mapeo geomecánico en labores subterráneas

La evaluación geomecánica ha sido realizada íntegramente dentro y en áreas circundantes al Túnel Victoria y Crucero 810 con la finalidad de caracterizar la masa rocosa a través de un índice numérico cuantitativo que permita discretizar la masa rocosa en dominios geomecánicos. Este mapeo geomecánico ha sido realizado usando el método Celdas de detalle. Es necesario precisar que una “Celda de detalle” constituye una “Estación geomecánica” tipificada correlativamente con la denominación “EG+ código de labor y el número de estación”, por ejemplo EG\_TV105 significa Estación geomecánica 105 ubicada en el Túnel Victoria.

Los parámetros de observación y medición definidos en el mapeo geomecánico de superficie y subterráneo fueron obtenidos y registrados en formatos estandarizados adecuándolos a las normas sugeridas por la “Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas” (I.S.R.M.). Entre los

parámetros evaluados en los registros geomecánicos, podemos destacar los siguientes: tipo de roca, tipo de estructura, orientación de discontinuidades estructurales, grado de fracturamiento, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, grado de alteración y condición de agua subterránea en la roca.

#### 2.3.4.4 Ensayos de campo

Estos ensayos se realizaron como parte del mapeo geomecánico, con el objeto de estimar datos de la resistencia a compresión de la roca usando el martillo de rebote y la picota de geólogo. Además se realizó mediciones directas en la masa rocosa para estimar el índice de calidad de roca RQD mediante determinación del número de discontinuidades por metro cúbico usando la formulación propuesta por Palmstrom ( $RQD=115-3.3*J_v$ ; donde  $J_v$  representa el número de discontinuidades presentes en un metro cúbico de volumen de roca). También se realizó la estimación del coeficiente de rugosidad de juntas (JRC).

#### 2.3.4.5 Relogeo geotécnico de sondajes diamantinos

Debido a la necesidad de conceptualizar la calidad de roca en niveles inferiores dada su inaccesibilidad se solicitó información respecto a los registros geotécnico de los sondajes diamantinos DDH-U-CA-12-010 y DDH-U-CA-

12-011 ubicados en el nivel 1020. Dicho reporte fue crucial para inferir el comportamiento de la masa rocosa en el entorno del proyecto.

#### 2.3.4.6 Toma de muestras para ensayos

Con la finalidad de tener una mejor apreciación de la calidad de roca y complementar los parámetros no auscultados en campo se realizó la selección de bloques rocosos para los respectivos Ensayos de Mecánica de Rocas en Laboratorio. Las muestras seleccionadas corresponden a bloques rocosos representativos cuyos códigos son: V1-V2-V3, C1-C2, F1 los cuales representan a las rocas volcánicas, calizas y filitas respectivamente.

#### 2.3.4.7 Investigación geomecánica de laboratorio

El programa de investigaciones geomecánicas en laboratorio para los propósitos de este informe, ha sido realizado sobre muestras seleccionadas en los dominios geomecánicos de interés seleccionando muestras representativas de cada unidad litológica. Estas muestras han sido ensayadas en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería, el mismo que cumple con los estándares y protocolos de ensayos que establece la American Society for Testing Materials (A.S.T.M.). Los ensayos de Mecánica de rocas, se han desarrollado sobre bloques de roca intacta y discontinuidades estructurales simuladas, según las especificaciones y

solicitud de ensayos definidas previamente durante los trabajos de mapeo geomecánico.

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería, son los siguientes:

- ❖ Constantes elásticas (ASTM D3148).
- ❖ Compresión simple (ASTM D2938).
- ❖ Compresión triaxial (ASTM D2664-95).
- ❖ Propiedades físicas (ASTM 2216-02)
- ❖ Corte Directo (D5607-95).
- ❖ Tracción indirecta (ASTM D3967).

La tabla 06, se aprecian los códigos de las muestras ensayadas, su ubicación referencial, los tipos de ensayos solicitados y los parámetros de interés que se esperan obtener en cada uno.

Tabla 06: Ensayos solicitados al laboratorio

Código de muestras	Ubicación	Ensayo	Norma	Parámetro evaluado
V1	Nv 970, Rp 387, hastial Derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)
V2	Nv 970, Bp 750, hastial Derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)
V3	Nv 820, túnel victoria, progresiva 4050 mt desde la bocamina-hastial derecho.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)
C1	Nv 1020, tajo 1020, panel 28, cuerpo huaripampa, frente de labor	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)

C2	Nv 1020, tajo 1020, panel 26, cuerpo huaripampa, frente de labor	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> ) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)
F1	Nv 920, Xc 918, hastial Derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> ) Porosidad (%) Absorción (%)
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)

Nota: La descripción de las muestras es la siguiente: V1, V2, V3 bloques de roca volcánica; C1, C2 Bloques de roca caliza; F1 bloque de roca filita.

### 2.3.5 Caracterización geomecánica

#### 2.3.5.1 Aspectos litológicos

Los dominios lito-estructurales conceptuados en los trabajos de investigación geomecánica de campo mostrado, evidencian a nivel local (Túnel Victoria-Xc 810 y su entorno físico Niveles 820, 870, 920, 970, 1020) la presencia de tres tipos de litología predominantes:

#### 2.3.5.2 Filitas

Estructuras rocosas, que según el cuadro tecto-estratigráfico serían la unidad litológica más antigua en el sector de interés (alcance del proyecto) y corresponderían al grupo Excélsior. Estas rocas a nivel macroscópico muestran bandeamiento y foliación con desarrollos marcados de los cristales en una dirección, se muestran estructuralmente muy fracturadas a intensamente fracturadas como consecuencia de la intensa actividad tectónica al que ha sido expuesta. Se exponen al N-NE del túnel Victoria.

#### 2.3.5.3 Conglomerados y brechas volcánicas

Estructuras rocosas constituidas por sedimentos continentales de coloraciones marrones y tonalidades rojizas intercaladas con clastos de rocas volcánicas y rocas calcáreas, de baja compacidad pobremente gradados. Estructuralmente se encuentra muy disturbada, se exponen en la transición entre el contacto falla Volcánico-Caliza.

#### 2.3.5.4 Flujos de lava, tufos, brechas y piroclastos

Estructuras rocosas de composición típicamente andesítica y en sectores de composición dacítica pertenecientes a los Volcánicos Catalina, en el sector de interés se aprecia su amplia exposición desde la Bocamina del Túnel Victoria y a lo largo de este en el tramo evaluado y del Xc 810, de moderada a alta

compacidad. Estructuralmente se encuentra ligeramente fracturadas y eventualmente muy fracturadas en sectores donde es intersectado por fallas.

#### 2.3.5.5 Calizas

Estructuras rocosas de composición calcárea, con discontinuidades que exponen rellenos de vetillas de calcita- pirita y niveles lutáceos, en el sector de interés se exponen al Oeste del Túnel Victoria y del Xc 810, son rocas de baja compacidad. Estructuralmente se encuentran muy fracturadas, intensamente fracturadas a descompuestas en sectores asociados a procesos de alteración hidrotermal argilización y zonas de contacto con las rocas Volcánicas donde se han generado intensos fallamientos inversos escalonados y sobre-escurrimientos sobre el volcánico) generados por esfuerzos compresivos.

#### 2.3.6 Distribución de discontinuidades

Para establecer las características de la distribución espacial de las discontinuidades estructurales (vetas, fallas) que involucra la masa rocosa asociada al Proyecto Túnel de Integración, durante el mapeo geomecánico se tomaron registros detallados respecto al tipo de discontinuidades estructurales y su orientación en la notación buzamiento / dirección de buzamiento como se aprecia en los registros del mapeo geomecánico. Estos datos orientacionales se han procesado estadísticamente empleando la técnica de

proyección estereográfica equiangular, utilizando como herramienta el software DIPS. Los resultados del análisis estereográfico de las discontinuidades estructurales (diaclasas y fallas) en la zona de interés se muestran en la tabla 07 y figura 09.

En la tabla 07, se aprecian resultados de la distribución espacial promedio de los principales sistemas de diaclasas y sistemas de fallamiento que representan el tramo evaluado del Túnel Victoria.

Tabla 07: Principales sistemas de discontinuidades

Zona	Dominio estructural	Tipo de estructura	Sistema de discontinuidades *		
			S1	S2	S3
Túnel victoria	Progresiva 0-3500	Diaclasas	66/001	78/190	42/095
	Progresiva 3500-5500	Diaclasas	60/004	42/174	54/077
	Progresiva 0-5500	Fallas	57/129	82/338	
Nota: * El sistema de discontinuidad estructural se ha tipificado según notación, Buzamiento / Dirección de buzamiento					

Es necesario precisar que el análisis estereográfico de fallas se ha realizado en todo el tramo del Túnel Victoria, del cual se aprecia que existen dos sistemas principales de fallas. Cada dominio lito-estructural se caracteriza por presentar un arreglo estructural propio, que en el estudio se denominan sistemas de diaclasas: S1, S2, S3 y sistemas de fallas S1 y S2 jerarquizados en orden descendente (1, 2, 3) por su grado de influencia e importancia en la estabilidad de excavaciones estructuralmente controlada. Estos sistemas de

fallas y diaclasas (discontinuidades estructurales) mostrados en la tabla 07, serán de interés para evaluar la dirección de los esfuerzos principales y realizar el análisis de estabilidad estructuralmente controlada.

En las figura 09, se muestran los diagramas de rosetas de los principales sistemas de diaclasas y fallas encontrados en los dominios geomecánicos conceptuados. Estas rosetas, representan la estadística de datos orientacionales de las discontinuidades estructurales presentes en cada dominio geomecánico.

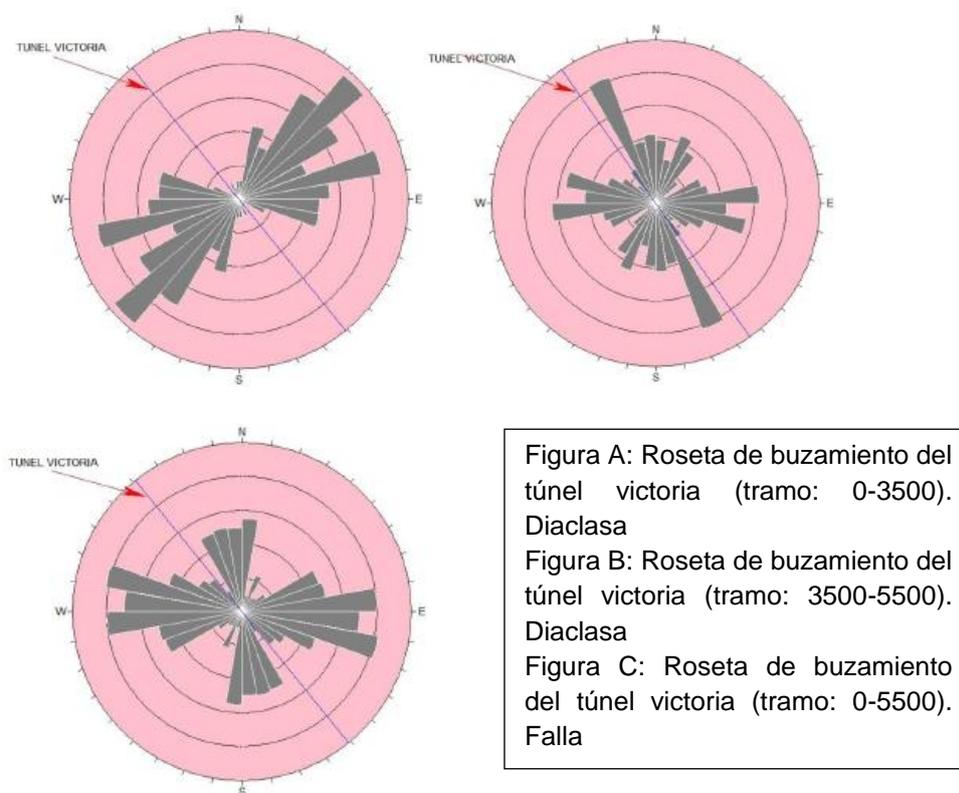


Figura 09: Roseta de buzamiento

Los resultados del proceso de datos estructurales, mostrados en tabla 07 y la figura 10 constituyen información válida para estimar la dirección de los esfuerzos principales, orientación de los ejes preferenciales de minado, el análisis de estabilidad estructuralmente controlada, la definición y dimensionamiento del sostenimiento en función a las dimensiones de excavación y el arreglo estructural que expone la masa rocosa. También muestran las cuñas a generarse con la gráfica del ploteo y los planos de intersección según los sistemas de discontinuidades.

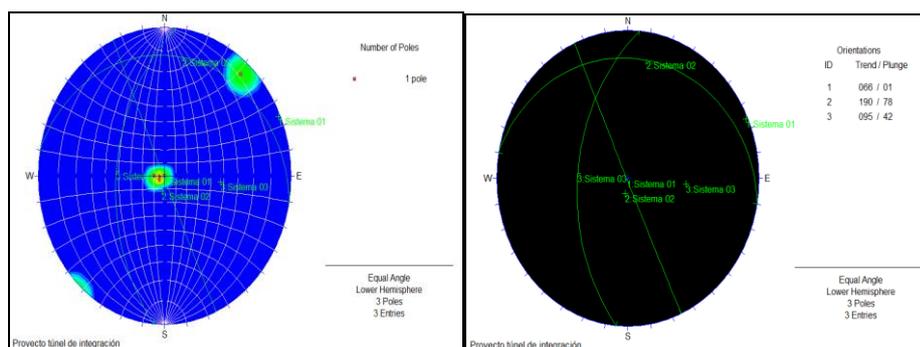


Figura 10: Ploteo y gráfica del sistemas de discontinuidades.

### 2.3.6.1 Aspectos estructurales

En este acápite se resumen las características más relevantes de los aspectos estructurales, cartografiados durante el mapeo geomecánico en afloramientos rocosos de superficie y excavaciones subterráneas (Túnel Victoria y su entorno físico). Las características estructurales promedias de las fallas (estructuras mayores) y diaclasas (estructuras menores) se describen en los siguientes acápites.

### 2.3.6.2 Fallas

Las características geomecánicas de las fallas presentes en el área de interés Túnel Victoria y su entorno físico presentan espaciamientos variables por lo general mayores a  $>2$  metros, con una la persistencia que vas desde unas decenas a cientos de metros, con aperturas muy abiertas, paredes de discontinuidad lisas, ocasionalmente exponen espejos de falla y ligeras ondulaciones. Estas fallas en los sectores evaluados por lo general presentan rellenos suaves del tipo milonitas las mismas que se muestran completamente disturbadas y alteradas, comúnmente se les denomina rellenos panizados del tipo Gauge, el espesor de los rellenos de falla es variable entre 0.05 metros hasta 1.0 metros, la influencia de estas fallas (halos de alteración) en el comportamiento de la roca varía desde unos escasos centímetros hasta unas decenas de metros, superficialmente se aprecian alteradas, muy alteradas a descompuestas, con presencia de agua en las paredes de las discontinuidades a modo mojado, goteo y ocasionalmente la presencia de flujos de ligero-moderado.

### 2.3.6.3 Diaclasas

La características geomecánicas de estas discontinuidades estructurales en los distintos dominios geo mecánicos que involucra las zonas de interés presentan espaciamientos variables entre 60-200, 20-60 centímetros (ligeramente fracturadas a fracturadas), puntualmente en ciertos sectores

también se aprecian espaciamentos entre los 6-20 y < 6 centímetros (muy fracturadas, a intensamente fracturadas), la persistencia es variable entre >20 metros, 10-20 metros, 3-10 metros, 1-3 metros y <1 metro, el grado de apertura en las paredes expuestas de estas diaclasas varía desde cerradas, angostas a muy angostas. En las zonas de falla (zonas de corte) las aperturas varían desde abiertas a angostas, la rugosidad en las paredes de estas discontinuidades varía desde rugosas a ligeramente rugosas, lisas a espejos de falla con ciertas ondulaciones, en cuanto al relleno de las discontinuidades, se puede precisar que estas por lo general se aprecian limpias y/o con rellenos del tipo óxidos, vetilleos de calcita y pirita masiva-diseminada especialmente a hacia las zonas donde existe la mineralización asociada a vetas en las rocas volcánicas.

En la zona de calizas se aprecian diaclasas con espaciamentos variables entre los 20-6 centímetros y <6 centímetros tipificadas como muy fracturadas, intensamente fracturadas a descompuestas, con persistencias variables entre 10-3 metros, 3-1 metros, < 1metro, el grado de apertura en las discontinuidades se define como muy abiertas a abiertas y ocasionalmente angostas, con rellenos suave<5mm, suave> 5mm; el grado de alteración se aprecia con mayor intensidad hacia el contacto falla con las rocas volcánicas y en las zonas donde ha ocurrido la mineralización de sulfuros por reemplazamiento (mantos-cuerpos).

### 2.3.7 Clasificación de la masa rocosa

Los valores de resistencia a la compresión uniaxial de la roca fueron estimados usando el martillo de rebote y la picota de geólogo, los valores del índice de calidad de roca RQD fueron determinados mediante el registro volumétrico de diaclasas utilizando la relación propuesta por Palmstrom. Como se refirió líneas arriba el criterio adoptado para clasificar la masa rocosa en este informe es la Clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski, modificado por Romana, 2000 cuyo rango de valoración se aprecia en el cuadro 06. Se emplea este criterio de clasificación para discretizar (sub-dividir) en rangos más ajustados la calidad de roca, evitando errores de sobre-estimación y sub-estimación de la calidad de masa rocosa.

Tabla 08: Criterios para la clasificación geomecánica

<b>Tipo de roca</b>	<b>Rango RMR</b>	<b>Clasificación</b>
I-A	91-100	Muy buena A
I-B	81-90	Muy buena B
II-A	71-80	Buena A
II-B	61-70	Buena B
III-A	51-60	Regular A
III-B	41-50	Regular B
IV-A	31-40	Mala A
IV-B	21-30	Mala B
V	<21	Muy mala
Nota: Clasificación RMR 89, modificada Romana 2000.		

La clasificación geomecánica de la masa rocosa para los propósitos del informe, se obtiene del proceso, análisis e interpretación de la información recopilada durante el mapeo geomecánico en afloramientos de superficie y excavaciones subterráneas y el relogueo de sondajes diamantinos empleando el criterio mostrado en la tabla 08, clasificando a calidad de masa rocosa, en los sectores de interés.

La tabla 09, se presenta el resumen de la Clasificación geomecánica de la masa rocosa que conforman los distintos dominios geomecánicos utilizando la Clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski; modificado por Romana, 2000.

Tabla 09: Clasificación geomecánica RMR<sub>89</sub>

PTI	Zona	Calidad de la masa rocosa				CLASIFICACIÓN
		Litología	Descripción lito-estructural de la masa rocosa	RMR	GSI	
Unidad de producción Yauli	Túnel victoria	Volcánico andesítico lavas-tufos	Estructura rocosa (dominio lito-estructural) caracterizada por la presencia de flujos lávicos de composición andesítica, con texturas afaníticas a porfíricas, de color mesócrata, tonalidades gradacionales entre verdosas a violáceas, fracturadas a muy fracturadas (zonas de falla y contacto con otras unidades litológicas). Las características del agua subterránea evaluada en y sobre el nivel 820 se aprecian ligeramente húmedas, húmedas, ligeramente mojadas; en sectores muy puntuales se exponen zonas de goteo-flujo moderado; en niveles inferiores al 820 la presencia del agua se caracteriza como húmeda, mojada, goteo y flujo. Las zonas con exposición de rocas malas a muy malas están asociadas a zonas de falla, zonas con alteraciones hidrotermales y contactos litológicos.	75	70	Buena A
				65	60	Buena B
				55	50	Regular A
				45	40	Regular B
				35	30	Mala A
				25	20	Mala B
		Calizas	Estructura rocosa caracterizada por la presencia de niveles clásticos (calizas-limoarcillitas, limolitas) intercalados con niveles mineralizados fuertemente alterados constituidos principalmente por ensamblajes de sulfuros-óxidos a modo de mantos o cuerpos de reemplazamiento. Estructuralmente se muestran muy fracturadas, intensamente fracturadas a desintegradas. La presencia del agua en niveles evaluados se puede tipificar como mojado-goteo-flujo. Es de suponer dadas las evidencias geológicas que en niveles inferiores al 1020, este dominio se encuentre saturado por presencia del nivel freático.	45	40	Regular B
				35	30	Mala A
				25	20	Mala B
				20	15	Muy mala
		Filitas	Estructura rocosa caracterizada por la presencia de filitas. Estructuralmente este dominio se muestra muy fracturado, intensamente fracturado a desintegrado. La presencia del agua en el nivel 820, asociado a este dominio se puede tipificar como húmedo, mojado-goteo y eventualmente flujos, que afectan significativamente su comportamiento mecánico degradando sus parámetros de resistencia.	45	40	Regular B
				35	30	Mala A
				25	20	Mala B

Del resumen mostrado en la tabla 09, se tiene la presencia de tres unidades litológicas (rocas volcánicas, calizas y filitas), en los cuales se puede apreciar que éstos exponen variados rangos de calidad de masa rocosa definidos como dominios geomecánicos caracterizados por presentar una valoración RMR<sub>89</sub>, modificada por Romana, 2000. Esta clasificación geomecánica que presenta

la masa rocosa en dominios geomecánicos (tabla 4), se resumen de la siguiente manera:

#### 2.3.7.1 Rocas volcánicas

**Buena A (RMR: 71-80).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfiríticas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas.

Estructuralmente se tipifica como un material levemente fracturado (RQD: >75), en sectores puntuales donde esta masa rocosa es intersectada por fallas se muestra fracturada (RQD: 50-75); presenta una resistencia a la compresión simple variable entre 100-180 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 2-0.6 metros y 0.6-0.2 metros, una persistencia variable entre los rangos >20 metros, 20-10 metros, aperturas entre las paredes de las discontinuidades variables entre los <0.1 mm, 1.0-0.1 mm.

Las superficies de las discontinuidades se muestran rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades éstas se encuentran limpias y en ocasiones presentan rellenos duros (sulfuros) y rellenos suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran sanas a ligeramente alteradas; superficialmente se muestran secas a parcialmente húmedas.

**Buena B (RMR: 61-70).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfíricas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas. Estructuralmente se tipifica como un material fracturado (RQD: 50-75), en sectores puntuales (presencia de fallas) la masa rocosa se muestra muy fracturada (RQD: 40-50); presentan una resistencia a la compresión simple variable entre 50-90 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.6-0.2 metros, 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 20-10 metros, 10-3 metros, aperturas entre las paredes de las discontinuidades variables entre los 0.1-1.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades mayormente éstas se muestran limpias y en algunos sectores se exponen rellenos duros (sulfuros) y suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran ligeramente alteradas; superficialmente se muestran parcialmente húmedas y eventualmente presentan goteo en zonas puntuales asociados a fallas.

**Regular A (RMR: 51-60).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfíricas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas. Estructuralmente se tipifica como un material fracturado (RQD: 50-75), en sectores donde se exponen fallas la masa rocosa se muestra muy fracturada (RQD: 40-50); presentan una resistencia a la compresión simple variable

entre 40-50 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.6-0.2 metros, 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 20-10 metros, 10-3 metros, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran rugosas a ligeramente rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos duros (sulfuros) y suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades muestran ligera a moderada alteración; superficialmente se muestran húmedas a parcialmente mojadas y eventualmente presentan zonas de goteo asociados a la presencia de fallas.

**Regular B (RMR: 41-50).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfiríticas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas. Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado a intensamente fracturado (RQD: 30-40), presentan una resistencia a la compresión simple variable entre 30-40 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.6-0.2 metros, 0.2-0.06 metros, <0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 10-3 metros, 3-1 metros, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza

por exponer rellenos suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran moderadamente alteradas; superficialmente se muestran húmedas a mojadas y eventualmente zonas de goteo asociados a la presencia de fallas.

**Mala A (RMR: 31-40).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfiríticas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas. Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado a intensamente fracturado (RQD: 30-40, 25-30 asociado a zonas de falla), presentan una resistencia a la compresión simple variable entre 25-30 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.2-0.06 metros, <0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 10-3 metros, 3-1 metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades la mayoría se caracteriza por exponer rellenos suaves (óxidos, carbonatos, gauge); las paredes expuestas de las discontinuidades muestran alteradas a muy alteradas; superficialmente se muestran húmedas a mojadas y eventualmente exponen zonas de goteo asociados a la presencia de fallas.

**Mala B (RMR: 21-30).**- Este dominio se constituye litológicamente por lavas y tufos volcánicos de composición andesítica con texturas afaníticas a porfiríticas, de tonalidades que van desde verdosas a violáceas muy alteradas. Estructuralmente se tipifica como un material intensamente fracturado (RQD: 25-30 asociado a zonas de falla), presentan una resistencia a la compresión simple variable entre 5-25 Mpa; las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento <0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 3-1 metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades variables entre 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas a lizas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos suaves (óxidos, gauge); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran muy alteradas a descompuestas; superficialmente se muestran mojadas, con goteo asociados a la presencia de fallas.

#### 2.3.7.2 Rocas calizas

**Regular B (RMR: 41-50).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas de composición calcárea, con texturas esparíticas, de coloraciones gris-oscuro con tonalidades amarillentas producto de alteraciones asociadas a procesos meteóricos y alteraciones hidrotermales asociadas a la mineralización. Estas rocas también presentan rellenos

constituidos por vetillas de calcita, pirita y óxidos intercalados con niveles lutáceos, de baja compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material fracturado a muy fracturado (RQD: 30-40); presenta una resistencia a la compresión simple variable entre los 30-40 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.6-0.2 metros, 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 10-3 metros, 3-1 metros, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas a lisas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran moderadamente alteradas; superficialmente se muestran húmedas a mojadas y eventualmente exponen zonas de goteo asociados a la presencia de fallas.

**Mala A (RMR: 31-40).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas de composición calcárea, con texturas esparíticas, de coloraciones gris-oscuro con tonalidades amarillentas producto de alteraciones asociadas a procesos meteóricos y alteraciones hidrotermales asociadas a la mineralización. Estas rocas también presentan rellenos constituidos por vetillas de calcita, pirita y óxidos intercalados con niveles lutáceos, de baja compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado a intensamente fracturada (RQD: 25-30); presenta una

resistencia a la compresión simple variable entre los 25-30 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 3-1 metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas a lisas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos suaves (óxidos, carbonatos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran alteradas a muy alteradas; superficialmente se muestran mojadas y eventualmente exponen zonas de goteo asociados a la presencia de fallas.

**Mala B (RMR: 21-30).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas de composición calcárea, con texturas esparíticas, de coloraciones gris-oscura con tonalidades amarillentas producto de alteraciones asociadas a procesos meteóricos y alteraciones hidrotermales asociadas a la mineralización. Estas rocas también presentan rellenos constituidos por vetillas de calcita, pirita y óxidos intercalados con niveles lutáceos, de baja compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado a intensamente fracturada (RQD: 25-30); presenta una resistencia a la compresión simple variable entre los 5-25 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.2-0.06 metros, una

persistencia variable entre los rangos 3-1 metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran lisas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos suaves (óxidos, carbonatos y rellenos arcillosos del tipo gauge); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran muy alteradas; superficialmente se muestran mojadas y con zonas de goteo moderado asociados a la presencia de fallas.

**Muy Mala (RMR: < 21).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas de composición calcárea, con texturas esparíticas, de coloraciones gris-oscura con tonalidades amarillentas producto de alteraciones asociadas a procesos meteóricos y alteraciones hidrotermales asociadas a la mineralización. Estas rocas también presentan rellenos constituidos por rellenos suaves tipo gauge, óxidos, recristalizaciones de carbonatos intercalados con niveles lutáceos, de baja compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material intensamente fracturado a descompuesto (RQD: <25); presenta una resistencia a la compresión simple variable entre los <5 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre < 0.06 metros, una persistencia < 1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm y >5 mm; las superficies de discontinuidades se muestran lisas y eventualmente

planas- espejos de falla; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se caracteriza por exponer rellenos suaves (rellenos arcillosos del tipo gauge); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran muy alteradas a descompuestas; superficialmente se muestran mojadas y con goteo moderado asociados a la presencia de fallas. En niveles inferiores al 970 se aprecian flujos de agua en esta unidad litológica.

**NOTA:** Es necesario precisar que en las rocas calizas existen zonas donde se exponen calizas silicificadas tipificadas como nódulos de **CHERT** y calizas frescas (color gris azulado, inalteradas por procesos hidrotermales) cuyos parámetros de resistencia presentan valores altos. Las muestras C1-C2 se han seleccionado de estos sectores con la finalidad de evaluar sus características intrínsecas (mi) para ajustar los valores estimados en campo y los obtenidos por aproximaciones empíricas mediante la aplicación de los criterios de rotura.

#### 2.3.7.3 Rocas filitas

**Regular B (RMR: 41-50).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas metamórficas que exponen una marcada foliación y bandeamiento de coloraciones grises con tonalidades verdosas debido a la predominancia de cristales máficos desarrollados en forma de pseudo-bandeamientos. Estas rocas se caracterizan por presentar rellenos constituidos por vetillas de cuarzo, pirita y óxidos y una alta compacidad.

Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado (RQD: 30-40); con una resistencia a la compresión simple variable entre los 30-40 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.6-0.2 metros, 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 10-3 metros, 3-1 metros, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran rugosas a ligeramente rugosas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se puede acotar que estas se caracterizan por exponer rellenos duros y suaves (cuarzo, pirita, óxidos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran moderadamente alteradas; superficialmente se muestran húmedas a mojadas.

**Mala A (RMR: 31-40).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas metamórficas que exponen una marcada foliación y bandeamiento de coloraciones grises con tonalidades verdosas debido a la predominancia de cristales máficos desarrollados en forma de pseudo-bandeamientos. Estas rocas se caracterizan por presentar rellenos constituidos por vetillas de cuarzo, pirita y óxidos y una alta compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material muy fracturado a intensamente fracturado (RQD: 25-30); con una resistencia a la compresión simple variable entre los 25-30 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 3-1

metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran ligeramente rugosas a lizas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se puede acotar que estas se caracterizan por exponer rellenos duros y suaves (cuarzo, pirita, óxidos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran alteradas a muy alteradas; superficialmente se muestran mojadas asociadas a la presencia de fallas.

**Mala B (RMR: 21-30).**- Este dominio se constituye litológicamente por estructuras rocosas metamórficas que exponen una marcada foliación y bandeamiento de coloraciones grises con tonalidades verdosas debido a la predominancia de cristales máficos desarrollados en forma de pseudo-bandeamientos. Estas rocas se caracterizan por presentar rellenos constituidos por vetillas de cuarzo, pirita y óxidos y una alta compacidad. Estructuralmente se tipifica como un material intensamente fracturado (RQD: 25-30); con una resistencia a la compresión simple variable entre los 5-25 Mpa. Las características geomecánicas de las discontinuidades estructurales en promedio presentan un espaciamiento que varía entre 0.2-0.06 metros, una persistencia variable entre los rangos 3-1 metros, <1 metro, las aperturas entre las paredes de las discontinuidades son variables entre 0.1-1.0 mm, 1.0-5.0 mm; las superficies de discontinuidades se muestran lizas; en cuanto al material de relleno presente entre las discontinuidades se puede acotar que estas se caracterizan por exponer rellenos suaves (pirita, óxidos, rellenos arcillosos); las paredes expuestas de las discontinuidades se muestran muy

alteradas; superficialmente se muestran mojadas y con goteo moderado asociados a la presencia de fallas.

### **2.3.8 Zonificación geomecánica**

La aplicación racional de los diferentes métodos de cálculo en la Mecánica de rocas, requiere fundamentalmente que la masa rocosa en evaluación, se encuentre sectorizada (dividida) en áreas con similares características lito-estructurales y físico-mecánicas debido a que el análisis de los resultados y los criterios de diseño serán válidos sólo dentro de masas rocosas con similares características denominadas como dominios geomecánicos. En este contexto la litología, el grado de alteración, el arreglo estructural, las propiedades resistentes de la roca, las propiedades de las discontinuidades estructurales serán criterios de interés para permitan definir los dominios geomecánicos presentes en la masa rocosa (proceso de zonificación geomecánica).

Según evaluaciones realizadas topográfica, geológica, análisis estereográfico de las discontinuidades estructurales, clasificación geomecánica RMR89 de Bieniawski de la masa rocosa modificada por Romana 2000 el área de interés se ha dividido en dominios geomecánicos atendiendo a las tres unidades Lito-estructurales (filitas, volcánicos y calizas); en estas unidades lito-estructurales se ha realizado el mapeo geomecánico y se resume en la tabla 4, donde se ha logrado clasificar la masa rocosa con un índice numérico cuantitativo que

divide a la masa rocosa en dominios geomecánicos que se caracterizan por presentar rangos de valoración diferentes. El proceso de zonificación geomecánica de la masa rocosa implica plasmar los resultados obtenidos de la valoración RMR89 sobre los planos de planta en los distintos niveles evaluados y cortes transversales al rumbo del Túnel. La interpretación y correlación de estos dominios usando criterios de interpolación e información de los datos estructurales permite elaborar el Modelo geomecánico conceptual de la masa rocosa presente en el área de interés. Los resultados del proceso de zonificación geomecánica (planos y perfiles del modelo geomecánico conceptual) se muestran el plano TES-PTI-2015-IB-007 (Planos de zonificación geomecánica).

Una característica “particular e importante” de la calidad de masa rocosa en las distintas unidades litológicas es que su calidad geomecánica, está asociado a los controles estructurales, los grados de alteración y su posición espacial referida a la ocurrencia de estructuras mineralizadas en sus distintos estadios. Por ejemplo conforme distan del contacto con las estructuras mineralizadas y fallas se aprecia una mejor calidad de roca, esta característica es un indicador que las alteraciones asociadas a los procesos hidrotermales y la tectónica del sector han influenciado significativamente en el deterioro de las propiedades resistentes de la masa rocosa. Otra característica importante es que las estructuras mineralizadas vistas en un corte transversal están definidas y delimitadas por fallas. Estas se extienden en el rumbo de las estructuras mineralizadas desde el punto de vista geológico representan un control

estructural importante de la mineralización; sin embargo desde el punto de vista geomecánico representan un problema para crítico para la estabilidad estructuralmente controlada ya que en los contactos se exponen los dominios geomecánicos de menor calidad los cuales estructuralmente se encuentran muy disturbados con presencia del agua y materiales blandos (rellenos arcillosos del tipo milonitas y gauge) de baja o nula resistencia a los esfuerzos de corte.

### **2.3.9 Estimación de los parámetros de resistencia**

#### **2.3.9.1 Resistencia de la roca intacta**

Para estimar la resistencia de la roca, se realizaron una serie de ensayos en campo (resistencia a compresión simple usando el martillo de rebote y la picota de geólogo) y ensayos de Mecánica de Rocas en Laboratorio (propiedades físicas, compresión simple, compresión triaxial, constantes elásticas) como se aprecia en las tablas 10 y 11 (Los resultados de los ensayos de campo y laboratorio).

Tabla 10: Resultado de los ensayos realizados en campo

Dominio Lito-estructural	Dominio geomecanico	Peso específico (KN/m3)	Resistencia a la compresión simple (Mpa)		Coefficiente de rugosidad de juntas
			Picota de geólogo Mpa	Martillo Schmidt Mpa	JRC
Lavás - tufos volcánicos	1	2.8-3.0	> 100	> 120-150	14-16
	2	2.7-2.8	50-100	60-90	12-14
	3	2.5-2.7	50-100	45-60	10-12
	4	2.4-2.5	25-50	30-40	8-10
	5	2.3-2.4	5-25	-	6-8
	6	2.2-2.3	< 5	-	2-4
Calizas	1	2.3-2.4	25-50	35-50	6-8
	2	2.2-2.3	25-50	30-35	4-6
	3	2.1-2.2	5-25	-	2-4
	4	2.0-2.1	< 5	-	0-2
Filitas	1	2.5-2.6	25-50	35-50	8-10
	2	2.4-2.5	5-25	30-35	4-6
	3	2.2-2.4	< 5	-	2-4
Falla 01	180		10-5	-	0-2
Falla 02	180		10-5	-	0-2
<p>Nota: Estimaciones según pruebas directas durante el mapeo geomecanico.</p> <p>* Falla 01: Falla con relleno del tipo brechoide, carbonatos, sulfuro.</p> <p>* Falla 02: Fallas con relleno suave (óxidos, carbonatos recristalizados y gauge.</p> <p>Lo resultados de estimación son ambiguos.</p>					

Tabla 11: Resultado de los ensayos en laboratorio

Código de muestras	Ubicación	Ensayo	Norma	Parámetro evaluado	Valoración
V1	Nv 970, Rp 387, hastial derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)	2.6.28 2.07 0.77
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	67.33
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	28.02 0.12
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	44.45 16.93 11.78
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	7.65 0.31
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	5.15
V2	Nv 970, Bp 750, hastial derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)	25.64 2.69 1.03
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	117.81
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	28.02 0.116
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	50 24.28 15.9
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	12.77 0.28
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	10.75
V3	Nv 820, túnel victoria, progresiva 050 mt desde la bocamina-hastial derecho.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Porosidad (%) Absorción (%)	25.83 2.75 1.04
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	41.55
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	28.55 0.109
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	44.18 12.6 12.51
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	4.46 0.32
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	2.86
C1	Nv 1020, tajo 1020, panel 28, cuerpo huaripampa, frente de labor	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m3) Proosidad (%) Absorción (%)	27.29 0.93 0.34
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	165.49
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	28.21 0.11
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	54.61 29.26 21.36
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	14.21 0.29
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	12.01

C2	Nv 1020, tajo 1020, panel 26, cuerpo huaripampa, frente de labor	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> ) Porosidad (%) Absorción (%)	27.37 0.75 0.27
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	209.08
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	28.25 0.111
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	59.78 30.5 28.33
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	22.84 0.28
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	10.09
F1	Nv 920, Xc 918, hastial derecho ingresando.	Propiedades físicas	ASTM-2216-02	Peso específico aparente (KN/m <sup>3</sup> ) Porosidad (%) Absorción (%)	No se pudo obtener muestras durante la perforación del bloque debido a la naturaleza del bloque (fisurado0
		Compresión simple	ASTM-D2938	Resistencia a la compresión (Mpa)	
		Corte directo	ASTM-D5607-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa)	
		Compresión triaxial	ASTM-2664-95	Angulo de fricción residual (*) Cohesión (Mpa) mi	
		Constantes elásticas	ASTM-D3148	Módulo de young (Gpa) Modulo de poisson	
		Tracción indirecta	ASTM-D3967	Resistencia a la tracción (Mpa)	

### 2.3.9.2 Resistencia de las discontinuidades

La resistencia al esfuerzo de corte en las paredes de las discontinuidades, se ha estimado a través de los ensayos de laboratorio corte directo sobre discontinuidades simuladas. El resumen de los resultados de laboratorio para evaluar la resistencia de las discontinuidades se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12: Resultado de los ensayos de resistencia al corte

Dominio Lito-estructural	Dominio geomecánico	Resistencia a la compresión simple a la roca intacta		Ensayo de corte directo	
		$\sigma$ - normal	$\tau$	C	$\phi$
Lavas Tufos volcanicos	V1	5.45	3.01	0.12	28.02
	V2	5.45	3.01	0.12	28.02
	V3	5.45	3.06	0.11	28.55
Calizas	C1	5.82	3.21	0.11	28.21
	C2	7.83	4.39	0.11	28.25

Nota: Resultados obtenidos en el ensayo de corte directo - Laboratorio UNI.

De los resultados mostrados en tabla 12, podemos citar que los valores obtenidos para las muestras de rocas calizas (C1-C2) no serán representativas para propósitos de cálculos debido a que estas muestras han sido ensayadas para obtener parámetros intrínsecos de las rocas toda vez que los dominios geomecánicos en calizas para propósitos del Proyecto no tienen las calidades de roca que representan las muestras C1-C2.

### 2.3.9.3 Resistencia de la masa rocosa

Para la estimación de los parámetros de resistencia a nivel de la Masa Rocosa, en el Estudio se han utilizado los criterios de “Serafín-Pereira; 1983”, Hoek-Brown; 2002 y Karzulovic, 1999, los cuales toman como datos de entrada los resultados de la Clasificación geomecánica mostrados en las tablas 06-12. Estos criterios son empíricos, pero resultan prácticos en la estimación de los parámetros geomecánicos a nivel de la masa rocosa, supliendo en alguna forma el error que se genera al extrapolar directamente los resultados de

Ensayos de Mecánica de Rocas realizados en condiciones de Laboratorio, sobre muestras de roca intacta como parámetros de la masa rocosa, procedimiento que no considera el efecto de escalamiento. En la tabla 13, muestra el resumen de los parámetros estimados a nivel de la masa rocosa, utilizando los criterios de Criterio de H&B; 2002, Serafín- Pereira; 1983 y Karzulovic; 1999 basados en parámetros obtenidos de la Clasificación geomecánica, ensayos realizados en campo y laboratorio según sugieren las normas de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.

Tabla 13: Parámetros de resistencia de la masa rocosa

Calidad de la masa rocosa			Parámetros geomecánicos de la masa rocosa									
Litología	RMR	GSI	Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$	mi	mb	s	a	E (Mpa)	v	$\phi$	C (Mpa)
Volcánico andesítico Lavas - tufos	75	70	26.82	116.4	16	5.45	0.0083	0.501	27143	0.24	41.00	9.57
	65	60	26.64	76.2	12	2.82	0.0032	0.502	14614	0.26	36.00	6.55
	55	50	25.42	50.8	13	2.10	0.0010	0.502	8149	0.28	35.00	4.88
	45	40	24	35.0	12	1.41	0.0003	0.504	4736	0.28	26.00	1.23
	35	30	23	25.0	11	0.90	0.0003	0.508	2537	0.30	20.00	0.85
	25	20	22	5.0	9	0.52	0.0010	0.541	1211	0.33	9.00	0.29
Calizas	45	40	23	40.0	9	1.06	0.0010	0.504	4837	0.28	25.00	1.20
	35	30	22	30.0	7	0.57	0.0003	0.508	2603	0.30	18.00	0.74
	25	20	21	15.0	4	0.23	0.0003	0.541	1339	0.33	9.00	0.31
	20	15	20.5	5.0	3	0.14	0.0001	0.560	908	0.34	5.00	0.13
Filitas	45	40	25	40.0	10	1.17	0.0010	0.504	4836	0.28	25.00	1.31
	35	30	24	30.0	7	0.57	0.0003	0.508	2603	0.30	17.00	0.78
	25	20	22	15.0	5	0.29	0.0002	0.541	1339	0.33	10.00	0.35

Nota: Las estimaciones realizadas son como resultado de los criterios de H&B 2002.

Los parámetros de resistencia mostrados en la tabla 13, son los parámetros geomecánicos asignados al modelo geomecánico conceptual mostrado en planos de planta y secciones geomecánicas TES-PTI-2015-IB-007. Estos parámetros serán empleados como datos de ingreso INPUT para los análisis de estabilidad y cálculos geomecánicos posteriores en las áreas de interés para propósitos estrictamente asociados al Proyecto solo a nivel de factibilidad.

#### 2.3.9.4 Estimación del estado tensional

La roca en profundidad está sometida a una serie de esfuerzos resultantes como por ejemplo del peso de los estratos sobreyacentes para un caso puramente geoestático y adicionalmente debido a los esfuerzos de origen tectónico-residual, sísmológico para casos no geoestático. Independientemente de cual sea el caso geoestático o no geoestático al crear una excavación en la masa rocosa sometida a un estado de esfuerzos in-situ (preminado) su campo de esfuerzos es disturbado y en respuesta la masa rocosa genera una redistribución de los esfuerzos cuyo resultado conlleva a un nuevo estado de esfuerzos denominado esfuerzos inducidos en el entorno físico de la excavación. El conocimiento de la magnitud y dirección de los esfuerzos, es una componente esencial para el diseño subterráneo, debido a que ocurren casos donde la resistencia de la roca es superada por la magnitud de los esfuerzos inducidos, generándose la inestabilidad de la excavación.

Evaluar el estado tensional en la masa rocosa implica definir la dirección y la magnitud de los esfuerzos principales. Al respecto existen muchas formas de estimar éstos parámetros que van desde las técnicas sofisticadas como Over Coring, Hidrofracturamiento, mediciones acústicas hasta las técnicas deducidas de criterios empíricos (criterio de Bieniawski, criterio de fallas conjugadas, criterio de Sheorey, la utilización del mapa mundial de esfuerzos Zoback-992), entre otros).

Para los propósitos del informe basados en investigaciones del comportamiento tectónico andino en el contexto regional y utilizando los criterios de fallas conjugadas y las curvas de variación de la constante de transmisión de los esfuerzos desarrollada por Bieniawski en función a las profundidades en los distintos tramos, se han elaborado algoritmos que permiten evaluar la variación de la constante de transmisión de esfuerzos  $K$ . El resultado de estas aproximaciones matemáticas será la base para los cálculos de la magnitud de los esfuerzos principales válidos únicamente para los fines de éste informe.

#### 2.3.9.5 Dirección de esfuerzos

Para estimar la orientación de los esfuerzos, considerándose que en esta zona se carecen de estas estimaciones, en el presente Estudio se parte de la hipótesis de fallas conjugadas. Esta hipótesis postula que Las orientaciones de los esfuerzos principales a nivel local (Mina Carahuacra) están controlados en

alguna medida por la dirección de las falla principales ocurridas en el sector. Del análisis estereográfico (proyección de fallas y diaclasas), mostrados en la tabla 07 y la figura 10, se obtienen los siguientes sistemas de fallas conjugadas: (S1: 77/165; S2: 79/341); mediante la aplicación de la técnica de proyección estereográfica equiangular de estos sistemas de fallas y empleando el criterio de fallas conjugadas se obtienen los planos máximos de los esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$ ; cuya interpretación finalmente permite estimar la orientación de los esfuerzos principales.

La tabla 14, muestra los resultados de estimación conceptual de la orientación de los esfuerzos principales asociados al proyecto.

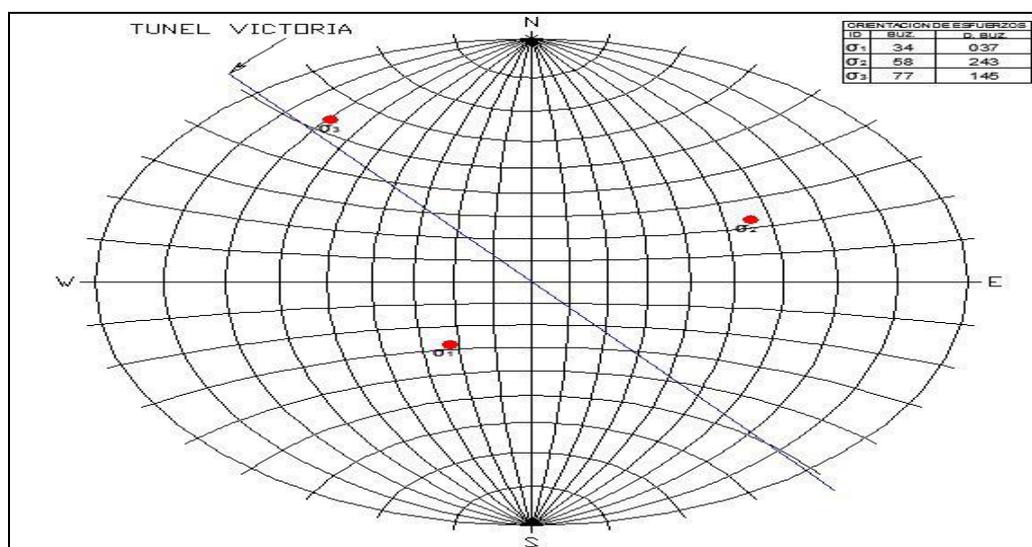


Figura 11: Orientación de los esfuerzos principales

Tabla 14: Magnitud de esfuerzos principales

<b>Esfuerzos</b>	<b>Etiqueta</b>	<b>Tramo 0-3500</b>	<b>Tramo 3500-6000</b>	<b>Tramo 6000-8000</b>
Esfuerzo máximo (Mpa)	$\sigma_1$	3.8	13.1	15.3
Esfuerzo medio (Mpa)	$\sigma_2$	3.8	11.9	15.7
Esfuerzo mínimo (Mpa)	$\sigma_3$	3.8	10.8	16.2

Nota: Para estimar la magnitud de los esfuerzos, se considera que en toda la extensión del proyecto túnel de integración la masa rocosa estara sometida a condiciones muy variables, debido a que según evidencias geológicas no se trata de un caso puramente geoestatico.

#### 2.3.9.6 Magnitud de esfuerzos

Como se precisa en el acápite 4.5.9, para estimar la magnitud de los esfuerzos en este informe, se ha tomado como base las investigaciones a nivel regional del comportamiento tectónico andino en función a la profundidad, los resultados de estas investigaciones establecen aproximaciones matemáticas que permiten evaluar la variación de la constante de transmisión de esfuerzos K como una función de la profundidad del minado debajo de la superficie. Estas aproximaciones matemáticas han sido la base para los cálculos referidos a la magnitud de esfuerzos principales asociados al proyecto, válidos únicamente y exclusivamente para los fines y alcances de este informe, los resultados de estas estimaciones se muestran en la tabla 14.

#### 2.3.9.7 Estimación del estado tensional

En base a la información obtenida del análisis estereográfico de las discontinuidades estructurales (fallas y diaclasas) como se muestra en la tabla 07 y figuras 09-10; en el área de interés se prevé que los modos probables de falla a desarrollarse desde los hastiales y corona de la excavación según el eje del Proyecto Túnel de Integración serán las fallas del tipo Cuña cuyo desprendimiento dependiendo de su ubicación espacial en los frentes de excavación será por deslizamiento y gravedad respectivamente. Es necesario precisar que éstos serán los modos de falla que potencialmente puedan desarrollarse en las áreas de interés proyecto; en éste contexto los Análisis de estabilidad estructuralmente controlada que debe realizar la empresa consultora a cargo de la dirección del proyecto se orientarán a determinar el F.S para el mecanismo de fallas del tipo Cuña independientemente de donde provienen, (paredes o corona de la excavación).

### **CAPITULO III**

#### **MARCO TEORICO**

##### **3.1. EXCAVACIÓN**

El Proyecto de tesis, forma parte de la ingeniería a nivel de factibilidad para la construcción del Proyecto Túnel de Integración de las Minas Carahuacra – San Cristóbal – Andaychagua, que consiste en la construcción de un Túnel paralelo al actual túnel Victoria y continuar con la excavación del Xc-810. La idea fundamental es viabilizar el transporte de mineral, relleno, relaves y servicios mina que actualmente se vienen efectuando en las unidades antes mencionadas. El proyecto de tesis se ha realizado para reducir los costos operativos, mejorar la productividad de las referidas minas con la meta de incrementar la producción a 8,000 tpd y 6,000 tpd de las plantas Victoria y Andaychagua respectivamente.

Todo esto ha sido elaborado sobre la base de las evaluaciones económicas y estudios de campo efectuados por colegas que en su tiempo no pudieron ejecutarlo debido a la coyuntura de los precios internacionales, sus conclusiones y recomendaciones se han tomado en cuenta para la elaboración de este estudio.

Por lo anteriormente indicado se realizaron vistas de evaluación al Túnel Victoria y Xc-810 de las minas Carahuacra y San Cristóbal siendo asistidos por Ingenieros geólogos, geomecánicos y mineros que laboran en las minas antes mencionadas, quienes me facilitaron la información necesaria, y además ofrecieron explicaciones en referencia con sus planes de minado y las metas que esperan conseguir en el corto y mediano plazo. La presente tesis de grado que detalla la construcción del proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra – San Cristóbal – Andaychagua contiene el expediente técnico - ingenieril y económico, así como el cronograma de ejecución durante su horizonte dado.

En el aspecto técnico, el trazo del nuevo túnel, se ha emplazado de forma paralela al eje del actual Túnel Victoria para después continuar con la construcción del Xc-810 en dirección hasta Andaychagua, tomando en consideración que las condiciones geológicas, geotécnicas é hidrogeológicas que presenta el actual Túnel Victoria y Xc-810, pueden ser inferidas a la trayectoria del eje del nuevo túnel. La base ingenieril, considera los estándares operacionales de construcción, incidiendo en la normativa vigente

D.S. 055-2010-EM, para esto se ha diseñado a nivel de ingeniería de factibilidad las labores a construir. Dichas labores también cumple con el estándar de la corporación volcán de esta manera hemos aplicado la seguridad desde la fase de diseño. La evaluación económica ha permitido demostrar lo estratégico del Túnel de Integración y en base al VAN y TIR del proyecto, poder justificar su inversión y el retorno del mismo.

### **3.2. OBJETIVOS**

- ❖ Mostrar el proceso constructivo del Proyecto Túnel de Integración.
- ❖ Establecer el ciclo constructivo.
- ❖ Presentar la ingeniería de factibilidad del proceso constructivo.
- ❖ Programa de avances y cronograma del mismo.

### **3.3. ETAPAS DEL PROYECTO**

El proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra – San Cristóbal – Andaychagua, será construido en 2 etapas, las cuales se muestran en la siguiente figura.

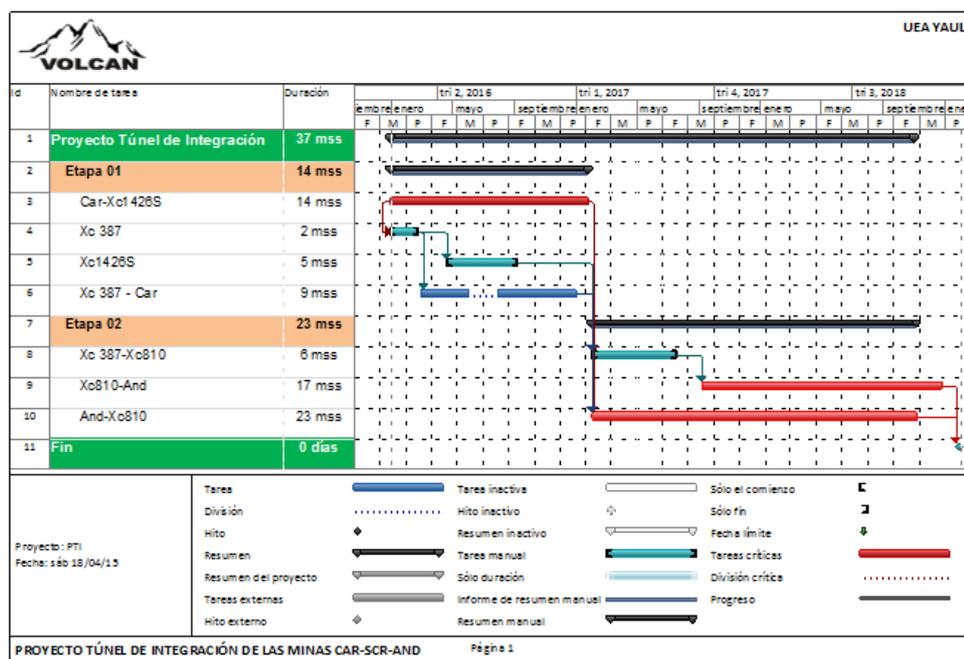


Figura 12: Diagrama del Gantt del Proyecto Túnel de Integración

La figura 12, muestra las etapas y las fases constructivas del proyecto Túnel de Integración, la idea es poder controlar en el tiempo de ejecución de cada etapa y fase. En el Anexo 01 y Anexo 02 se detalla el diagrama de Gantt y el diagrama de Redes del proyecto, respectivamente.

Las etapas están compuestas por fases de trabajo y serán construidos por 02 frente de excavación con dirección al encuentro, de esta manera generaremos una proceso constructivo eficiente. Cada fase de trabajo tiene un CAPEX asociado para su construcción, así como un tiempo de ejecución.

### 3.4. PROGRAMA DE AVANCES

En función al rendimiento de equipos, mano de obra y recursos con los que contamos, se ha establecido un programa de avances realista que me permita cumplir con los objetivos del proyecto. Dicho programa será la línea base de la excavación tanto en tiempo como en recursos y deberá cumplirse a fin de entregar la obra en el horizonte del mismo.

Tabla 15: Programa de metros de avance

<b>Etapa</b>	<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>
01	Túnel	mt	3,475.00
01	Cámara	mt	450.00
01	Refugio	mt	124.00
01	Desquinche	mt	737.00
02	Túnel	mt	5,009.00
02	Cámara	mt	625.00
02	Refugio	mt	156.00
<b>Total</b>		<b>mt</b>	<b>10,576.00</b>

Tabla 16: Programa de metros de avance del Túnel

<b>Etapa</b>	<b>Fase</b>	<b>Tiempo (mes)</b>	<b>Metros</b>
01	Car-Xc1426S	14.00	2,140.00
01	Xc 387	4.00	140.00
01	Xc1426S	5.00	737.00
01	Xc 387-Car	7.00	1,195.00
01	Xc 387 - Xc 810	8.00	832.00
02	Xc810-And	17.00	2,147.00
02	And-Xc810	24.00	2,030.00
<b>Total</b>		<b>37.00</b>	<b>9,221.00</b>

En el anexo 03 se muestra el detalle del programa de los metros de avance del Proyecto Túnel de Integración, el programa de desmonte a producir por labor y graficas adjuntas.

Como se puede apreciar en los cuadros la longitud total del Túnel de Integración es de 9,221.00 metros de los cuales 737.00 metros corresponden a la ampliación de sección de una labor antigua de sección 3.5x3.0. Para construir el Túnel de manera eficiente es necesario realizar cámaras de almacenamiento y carguío tipo delta cada 200.00 metros, de la misma manera, tal y como dice la normativa vigente construiremos refugios cada 50 metros para el resguardo del personal.

Como el inductor de costos es metro lineal de avance del Túnel, todos los cálculos de índices, costos y evaluación serán comparados con los metros totales del Túnel de Integración principalmente.

Cada etapa y fase de trabajo es independiente una de la otra, debido a que tendrán sus propios recursos y estos serán de exclusividad a fin de cumplir con la meta establecida en el programa de avances.

### **3.5. PROCESO CONSTRUCTIVO**

La ingeniería de túneles hace posible muchos servicios vitales, submarinos y subterráneos. Se utilizan técnicas únicas de diseño y construcción, debido a la necesidad de proteger a los constructores y usuarios de estos servicios de los agentes externos. Estos servicios deben construirse para dejar fuera los materiales a través de los que pasan, incluyendo el agua.

El Túnel de integración deberá de soportar altas presiones. Y cuando se usan para el transporte o la ocupación humana, los túneles deben proveer iluminación adecuada y una atmósfera segura, con medios para eliminar los contaminantes.

Es por esta razón que el Proyecto Túnel de Integración será un activo de gran escala y estratégico para la corporación VOLCAN, beneficiando en la

reducción de su OPEX, reducción de impactos al medio ambiente y comunidades.

### **3.5.1. Secuencia**

Para la secuencia constructiva he considerado los siguientes procesos: perforación, voladura, ventilación, desate, sostenimiento, limpieza, acarreo y sostenimiento. Esta secuencia bien planificada deberá ser cíclica y periódica. Las excavaciones variarán según el tipo y tamaño de la sección así como de las condiciones del macizo rocoso. La operación se realizará en dos turnos por día. Las primeras cuatro actividades están relacionadas a la perforación del túnel, y con frecuencia establecen la velocidad de avance en la construcción del mismo. El avance de las otras actividades debe de estar coordinado con la velocidad de la perforación, mientras sea practicable hacerlo.

### **3.5.2. Secciones de las labores**

Los planos TES- PTI-2015-IB-EST-001, TES- PTI-2015-IB-EST-002, TES- PTI-2015-IB-EST-003, muestra la sección típica de las labores a excavar. Dichas labores cumplen con la normativa vigente D.S-055-EM 2010.

Tabla 17: Parámetros de diseño

Labor	Base	Altura	Área	Densidad
Túnel	5.5	5.5	30.25	2.7
Cámara	4	4	16	2.7
Refugio	2	2	4	2.7
Desquinche	30.25	10.5	19.75	2.7

La sección de las labores a realizar es de tipo herradura y las dimensiones se muestran en la tabla 17, de esta manera se pretende equilibrar los esfuerzos en el perímetro de la corona y hastiales.

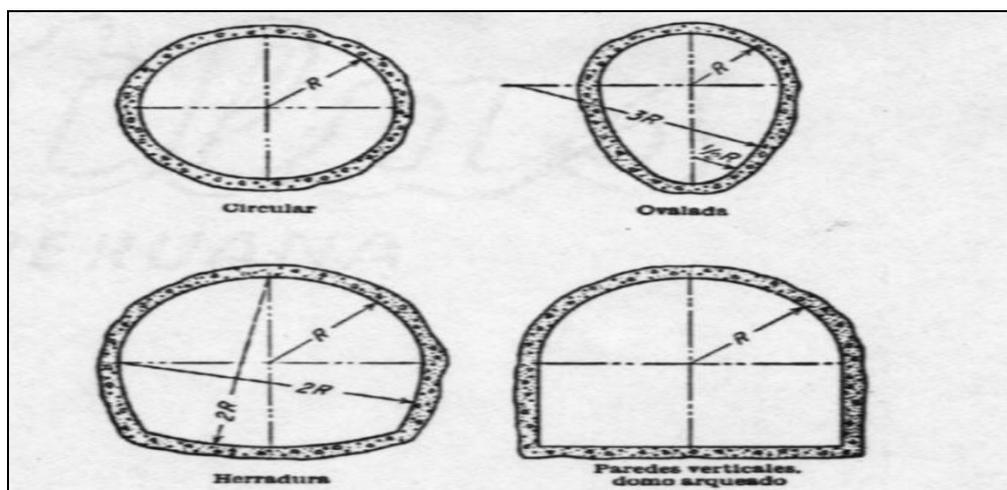


Figura 13: Secciones típicas en tunelería

### 3.5.3. Métodos de excavación

En algunas obras de construcción de túneles, las zonas de corte sirven como punto de partida para la excavación en roca o en material firme, o con TBM.

En túneles largos, como el Túnel de Integración, se utilizará una zona de corte

(o cara libre de 2.0x2.0). Dicha zona de corte ha sido calculada utilizando el Modelo de Langerfors el cual considera el diámetro del taladro, la densidad del explosivo, el de la roca y las condiciones del macizo rocoso.

A nivel mundial existen diferentes métodos de construcción de túneles, todos son buenos y están en función al tipo de roca principalmente y a la utilidad que se le dará, para nuestro caso, el Túnel de Integración servirá para el transporte de mineral hacia las plantas concentradoras Victoria y Andaychagua, transporte de relave, como servicios mina y drenaje de la misma. De los diferentes métodos existentes a nivel mundial tenemos lo siguiente:

- ❖ Método norteamericano
- ❖ Método inglés
- ❖ Método belga
- ❖ Método alemán
- ❖ Método Austriaco
- ❖ TBM
- ❖ Método de terrazas
- ❖ Método a toda cara.

Para el caso de la construcción del Túnel de Integración utilizaremos el método a sección completa o método a toda cara.

#### 3.5.3.1. Método a toda cara

Cuando se perfora un túnel con el método de ataque en toda la cara, se perfora todo el frente o cara, se cargan los taladros, y se hacen detonar los explosivos según la secuencia de detonación. Los túneles pequeños cuyas dimensiones no exceden de 20ftx20ft, se perforan siempre con este método.

El proyecto túnel de integración será perforado con este método. Debido al eficiente proceso de perforación y al uso de taladros de pre-corte, la popularidad de este método ha ido cada vez en aumento en la perforación de grandes túneles. Puede perforarse varios taladros a la vez utilizando para ello un equipo con varios brazos de perforación.

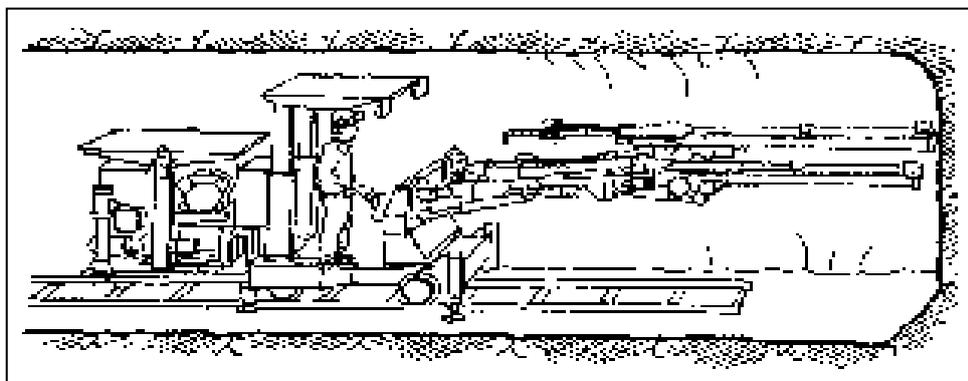


Figura 14: Esquema de perforación - Perfil longitudinal

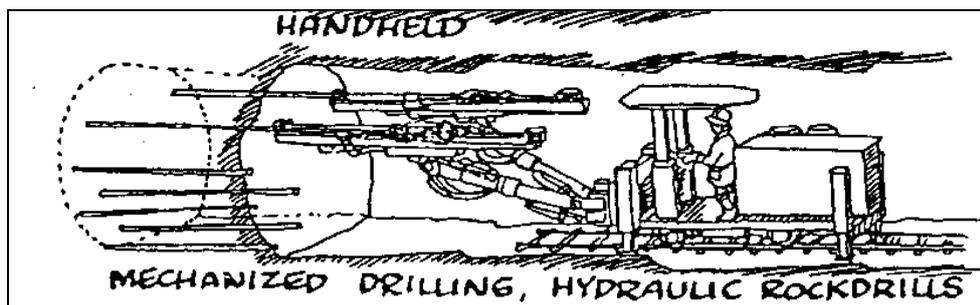


Figura 15: Esquema de perforación – Isométrico

#### 3.5.4. Ciclo constructivo

El Túnel de integración se construirá en 02 etapas y cada una de estas etapas tiene fases de avance; la primera etapa será construida por 02 frentes de ataque y en dirección al encuentro. Dentro del proceso constructivo y utilizando los rendimientos de los equipos y los recursos con los que contamos, se ha considerado un ciclo de 12 horas por guardia, este ciclo va desde la perforación, voladura, ventilación, desate, sostenimiento, limpieza y acarreo.

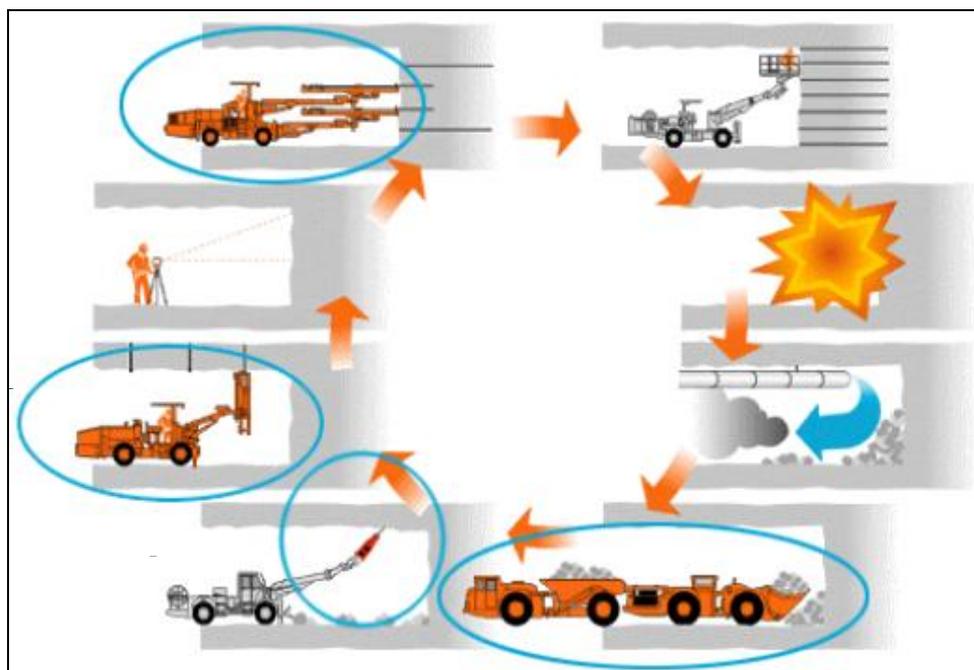


Figura 16: Ciclo constructivo – perfil circular

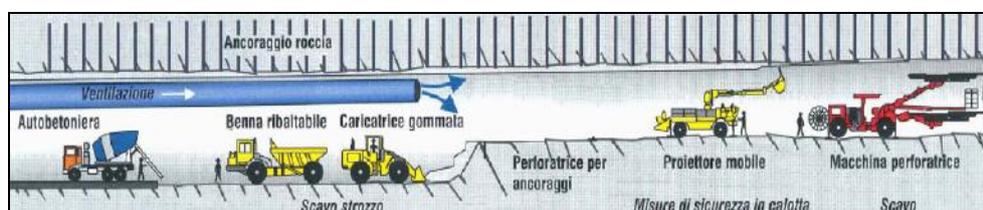


Figura 17: Ciclo constructivo – perfil longitudinal

### 3.5.4.1. Perforación

Al perforar un túnel a través del macizo rocoso, es necesario generar taladros o huecos para luego ser cargados con los explosivos que lo romperán. Con frecuencia utilizamos equipos mecánicos (Jackleg, Jumbo, Simba, etc.) para tal fin. Para el caso del Proyecto Túnel de Integración hemos considerado un

Jumbo de 02 de brazos, con barrenos de 12 pies, brocas de 51mm y rimadores de 101 mm, esto con el único fin de obtener una buena fragmentación del macizo, una menor sobre-rotura y por ende un menor costo en toda la cadena de valor del negocio.

La malla de perforación se detalla en el plano TES-PTI-2015-IB-PER-001, para ello he utilizado el Modelo de Langerfors que determina el burden y espaciamiento de los taladros y el Modelo de Holmberg para el cálculo de la zona de corte en el proceso de voladura. Para causar menor impacto al macizo rocoso en la corona y los hastiales, se ha diseñado taladros de pre-corte que ayudarán a liberar la energía de los gases y así poder generar las cañas en el avance del disparo.



Figura 18: Aplicación del sistema de perforación

#### 3.5.4.1.1. Componentes de la perforación

Es bien sabido que el sistema de perforación tiene 3 componentes principales, estos son: La perforadora, la barra de perforación y la broca, pero también existe un cuarto componente que es fluido (agua), el cual permitirá limpiar los detritus de los taladros. La perforadora se encarga de convertir la energía eléctrica o neumática en energía mecánica, la cual es transmitida a lo largo de la barra de perforación y esta a su vez a la broca, quien expulsa dicha manifestación penetrando el macizo rocoso y generando el taladro o hole.

#### 3.5.4.1.2. Factores influyentes

Existe una serie de factores que afectan al sistema de perforación del macizo rocoso, generando pérdidas de tiempo y dinero producto de una mala maniobrabilidad del equipo, no conocimiento del macizo rocoso, bajo rendimiento en la actividad y por ende altos costos por metro perforado.

Dichos factores son los siguientes:

- ❖ Perforadora
- ❖ Barra de perforación
- ❖ Broca
- ❖ Circulación del fluido
- ❖ Dimensiones del taladro

## ❖ Macizo rocoso

## 3.5.4.1.3. Parámetros de eficiencia

Mientras más sofisticado es el sistema de perforación, mayor será su control y por ende podremos obtener índices que nos permitan evaluar la eficiencia del sistema a fin de optimizar la actividad generando un menor costo en la cadena del valor del Proyecto Túnel de integración.

Dichos parámetros de eficiencias son: Potencia o energía específica, Ratio de penetrabilidad, consumo de aceros, costos. La eficiencia del sistema de perforación está determinada por el siguiente modelo:

$$e = \frac{E}{V} = \frac{P}{A * .PR} * PSF (or psi)$$

Dónde:

e : Specific energy

V : Volume of rock broken, ft<sup>3</sup>.

E : Blow energy (BPM).

A : Area of hole, ft<sup>2</sup>.

P.R : Penetration rate.

PSF : Pressure.

El modelo explica la importancia del tamaño del taladro, la presión de barrido y la fuerza de empuje de la perforadora.

$$P.R = \left( \frac{dV}{dT} \right) / A$$

Dónde:

P.R : Ratio de perforación

$dV/dt$  : Derivada del volumen de roca a remover respecto del tiempo.

A : Área de la sección del taladro.

De estas dos relaciones podemos llegar a la conclusión de que el P.R es DP a la fuerza de empuje de la perforadora, el tamaño de la broca y la energía de la máquina.

#### 3.5.4.1.4. Diseño de malla

Para el cálculo de la malla de perforación del frente del Proyecto Túnel de Integración se ha considerado el Modelo de Langerfors para estimar el burden y espaciamiento de los taladros para un tipo de roca de regular de buena calidad según el informe geomecanico.

Langerfors, es un investigador que considero al burden (B) como el parámetro predominante en el diseño de la voladura de rocas. Así mismo, destaca tres parámetros adicionales para obtener buenos resultados en

voladura de rocas: Ubicación de los taladros, carga explosiva y secuencia de salida. Además, tiene en cuenta la proyección, esponjamiento y el efecto microsísmico en las estructuras circundantes. Todas estas consideraciones están basadas en los principios de fracturamiento y de la ley de conformidad que este investigador propuso. En el anexo 04, se detalla los cálculos del burden y espaciamiento según el modelo para cada tipo de roca de la presente tesis, también se ha calculado el avance como función del diámetro del taladro según el modelo de Holmberg.

$$B_{\max} = \frac{D}{33} \sqrt{\frac{\rho_e \cdot PRP}{C \cdot f \cdot (S/B)}}$$

Dónde:

- $B_{\max}$  : Burden máximo (m)
- D : Diámetro del taladro (m)
- $\rho_e$  : Densidad del explosivo (gr/cc)
- PRP : Potencia relativa por peso del explosivo
- C : Constante de roca (calculada a partir de “c”)
- c : Cantidad de explosivo necesario para fragmentar 1 m<sup>3</sup> de roca, normalmente en voladuras a cielo abierto y rocas duras c = 0.4
- f : Factor de fijación que depende de la inclinación del taladro.

De lo anteriormente descrito, se ha tomado como base los conceptos del sistema de perforación y sus indicadores para calcular los recursos a utilizar durante todo el proyecto. Dentro de la infraestructura del Proyecto Túnel de Integración realizaremos labores como: Cámaras y refugios, así como desquinche o ampliación de sección. En las tablas 18 & 19 se muestra los parámetros de diseño de las labores a desarrollar, el número de taladros, los metros perforados y la eficiencia del mismo para cada sección. El detalle del cálculo de la vida útil, rendimientos y costos unitarios de los aceros, accesorios y materiales para la perforación, están plasmados en el anexo 05.

Tabla 18: Tipos de taladros y metros perforados

Descripción	Unidad	Túnel	Cámara	Refugio	Desquinche
Taladros cargados	Unidad	74	49	21	45
Pre corte	Unidad	5	5	3	5
Rimados	Unidad	6	5	3	0
Total taladros perforados	Unidad	85	59	27	50
Metros perforados	mp/disp	285.3 7	198.08	44.34	167.86
Metros perforados por metro de avance	mp/mt	89.47	62.11	28.42	52.63

Tabla 19: Parámetros de diseño de la perforación

Descripción	Unidad	Túnel	Cámara	Refugio	Desquinche
Base	mt	5.50	4.00	2.00	30.25
Altura	mt	5.50	4.00	2.00	10.50
Área	mt <sup>2</sup>	30.25	16.00	4.00	19.75
Burden	mt	0.63	0.63	0.63	0.63
Espaciamiento	mt	0.85	0.85	0.63	0.85
Taladros perforados - $\varphi= 2''$ ó 51 mm	#	85.00	59.00	27.00	50.00
Rimadores - $\varphi= 4''$ ó 101mm	#	6.00	5.00	3.00	0.00
Longitud de barra	ft	12.00	12.00	6.00	12.00
Eficiencia	%	0.92	0.92	0.90	0.92
Perforación efectiva	ft	11.04	11.04	5.40	11.04
Perforación efectiva	mt	3.36	3.36	1.64	3.36
Eficiencia voladura	%	0.95	0.95	0.95	0.95
Avance efectivo	ft	10.49	10.49	5.13	10.49
<b>Avance efectivo - experiencia</b>	<b>mt</b>	<b>3.19</b>	<b>3.19</b>	<b>1.56</b>	<b>3.19</b>
Profundidad según Holmberg	mt	3.21	3.21		3.21
<b>Avance efectivo - Holmberg</b>	<b>mt</b>	<b>3.05</b>	<b>3.05</b>	<b>0.00</b>	<b>3.05</b>

#### 3.5.4.2. Voladura

Puesto que la dinamita es un explosivo satisfactorio en algunos aspectos, los gases nocivos que producen lo hacen menos convenientes que otros explosivos en la construcción de túneles, en donde la ventilación puede llegar a ser uno de los principales problemas. También es posible utilizar el ANFO por su menor costo y su mayor efecto rompedor, pero a la vez genera más gases contaminantes en comparación con la dinamita.

Los explosivos detonarán con los detonadores no eléctricos, pentacord 3NP, armada de mecha lenta y mecha rápida. Para el proceso de detonación se ha utilizado la secuencia de salida de los taladros cargados, iniciando en la zona de corte. El plano TES-PTI-2015-IB-VOL-001, muestra la distribución de los taladros y la secuencia de salida de los mismos.



Figura 19: Aplicación del carguío de voladura

#### 3.5.4.2.1. Diseño del disparo

Al ser el macizo rocoso heterogéneo por cada metro lineal de avance en el Proyecto Túnel de Integración, la cantidad de energía necesaria para romper la roca a la fragmentación necesaria se hace compleja motivo por el cual no existe un modelo óptimo de disparo ya intervienen variables complejas y estocásticas (ver tabla 20).

Por lo tanto es necesario formular un modelo matemático que represente o simule un “disparo primario” y donde intervengan la mayor cantidad de parámetros y variables estocásticas. Aplicando técnicas de I.O y el uso de una computadora, hacer un análisis de sensibilidad hasta obtener resultados reales, representativos y aplicables a la operación minera en estudio. El Anexo 06, muestra los cálculos realizados para hallar los índices operativos de explosivos y accesorios de voladura, así mismo se encuentra el cálculo de la liberación de energía según el modelo de Holmberg y parámetros del diseño de voladura.

Tabla 20: Variable del diseño de voladura

<b>Variables</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Variables Controlables	Geométricas	Burden
		Diámetro
		Espaciamiento
		longitud de carga
		Sobre perforación
		Taco
		Altura de banco
		Profundidad del taladro
	Físico químicas	Tipo de mezcla
		Densidad de la mezcla explosiva
		Velocidad de detonación
		Presión de los gases
		Temperatura de los gases
		Energía térmica
	Tiempo	Tipo y tiempo de retardos
		Secuencia de la salida
	Operativas	Fragmentación
	Variables No Controlables	Aleatorias
Geología		
Hidrogeología		
Zonificación		
agua		

Para el proyecto Túnel de Integración hemos coincidido que la variable más importante y crítica es el burden y la variable que debe de medirse en una voladura es la fragmentación del macizo rocoso. Esta actividad debe ser monitoreada diariamente y a través de la prueba y error hemos optimizado la

fragmentación del macizo rocoso y establecido la cantidad de la carga explosiva y determinado la secuencia de salida del disparo.

#### 3.5.4.2.2. Cálculo de los parámetros de voladura

Una vez obtenida la malla de perforación óptima, se ha considerado para el diseño de la voladura, la emulsión como explosivo, esto debido a las condiciones del terreno, el cual tiene presencia de agua que degrada a la dinamita y al ANFO y la hace menos viable, además de tener un menor costo por kilogramo. Para la detonación hemos considerado fulminante #08 ya fabricado, detonadores no eléctricos secuenciados de periodo largo y la armada de mecha lenta de 1ft/min, así como la mecha rápida.

La cantidad de estos recursos han sido determinados por frente disparado y por labor a realizar, en tablas 19 y 20 muestras la cantidad de explosivo a utilizar y los índices del mismo. También se detalla el diseño de la secuencia de salida de los taladros y los halos de liberación de energía según las zonas de Holmberg en los planos TES-PTI-2015-IB-VOL-001 y TES-PTI-2015-IB-VOL-002, respectivamente.

Tabla 21: Cantidad de carga explosiva por tipo y labor

<b>Kilogramos de explosivos por tipo de taladros</b>					
<b>Explosivos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Túnel</b>	<b>Cámara</b>	<b>Refugio</b>	<b>Desquinche</b>
E3000 1-1/2"x24"	Kg/mt	29.05	17.98	12.73	0.00
E3000 1-1/2"x12"	Kg/mt	27.43	13.72	0.00	25.35
E3000 1-1/4"x12"	Kg/mt				
E1000 1-1/2"x24"	Kg/mt	4.09	3.50	1.36	1.75
E1000 1-1/2"x12"	Kg/mt	7.13	4.75	2.91	4.75
E1000 1-1/4"x12"	Kg/mt	3.00	4.00	2.05	5.50
<b>Total</b>	<b>Kg/mt</b>	<b>70.70</b>	<b>43.96</b>	<b>19.05</b>	<b>37.36</b>

Tabla 22: Índices de explosivos y accesorios de voladura (unid/mt)

<b>Distribución del tipo de explosivo al tipo de taladro</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Túnel</b>	<b>Cámara</b>	<b>Refugio</b>	<b>Desquinche</b>
Emulsión	kg/mt	70.70	43.96	19.05	37.36
Detonadores no eléctricos	unid/mt	23.20	15.36	13.46	14.11
Cordón detonante 3PN	mt/mt	56.44	37.62	19.23	31.35
Armada de mecha lenta	unid/mt	0.66	0.66	1.35	0.66
Mecha rápida	mt/mt	0.16	0.16	0.32	0.16

#### 3.5.4.3. Ventilación

Para esta actividad se ha realizado un informe, donde se detalla la necesidad de aire, el cálculo de ventiladores, la construcción de Raice borer y la determinación de las curvas de operación, de manera que tengamos una operación eficiente, segura y con altos estándares de seguridad y calidad del trabajo entregado. Revisar el ítem 3.8 VENTILACIÓN, de la presente tesis.



Figura 20: Aplicación del sistema de ventilación

#### 3.5.4.4. Sostenimiento

En base al estudio geomecánico realizado a lo largo del túnel victoria y Xc810, así como a la información obtenida de la geología regional y local, se ha determinado la zonificación a priori del Proyecto Túnel de Integración. Dicha zonificación ha permitido establecer los elementos de sostenimiento aplicarse que van desde el autoaporte hasta la colocación de cimbras, pasando por la colocación de pernos split set, pernos helicoidales, shotcrete y malla electrosoldada.



Figura 21: Aplicación del sostenimiento

Cada elemento de sostenimiento será aplicado según la evaluación geomecánica insitu, así mismo se debe generar una base de datos de los mapeos para corroborar el estudio con lo ejecutado.

#### 3.5.4.4.1. Parámetros de diseño

En base a la zonificación del macizo rocoso del Túnel Victoria y del Xc 810, hemos inferido el comportamiento geomecánico del Proyecto Túnel de Integración a lo largo de su eje, las tablas 23, 24 y 25 muestran los índices de consumos de los elementos de sostenimiento por metro lineal de avances, según la clasificación del estudio geomecánico.

Tabla 23: Índice de consumo del shotcrete por labor (m<sup>3</sup>/mt)

<b>Tipo de roca</b>	<b>Avance máximo</b>	<b>Túnel</b>	<b>Cámara</b>	<b>Refugio</b>	<b>Desquinche</b>	<b>Espesor (")</b>
<b>II A</b>	4.20	0.99	0.72	0.36	0.99	2.00
<b>II B</b>	3.60	0.99	0.72	0.36	0.99	2.00
<b>III A</b>	3.20	1.48	1.08	0.54	1.48	3.00
<b>III B</b>	2.50	1.48	1.08	0.54	1.48	3.00
<b>IV A</b>	2.00	1.98	1.44	0.72	1.98	4.00
<b>IV B</b>	1.50	1.98	1.44	0.72	1.98	4.00
<b>Ponderado</b>	<b>2.59</b>	<b>1.59</b>	<b>1.16</b>	<b>0.58</b>	<b>1.29</b>	<b>3.00</b>

Tabla 24: Índice de consumo de los pernos helicoidales por labor (pza/mt)

Tipo de roca	Avance máximo	Túnel	Cámara	Refugio	Desquinche	Malla
II A	4.2	2	2	1	2	Puntual
II B	3.6	3	3	2	3	2.30
III A	3.2	4	4	3	4	2.10
III B	2.5	5	5	3	5	1.70
IV A	2.00	6	6	4	6	1.60
IV B	1.50	8	8	5		0.00
<b>Ponderado</b>	<b>17</b>	<b>5.00</b>	<b>5.00</b>	<b>3.00</b>	<b>4.00</b>	

Tabla 25: Índice de pernos Split set por labor

Tipo de roca	Avance máximo	Túnel	Cámara	Refugio	Desquinche	Malla
II A	4.2	2	2	1	2	Puntual
II B	3.6	3	3	2	3	2.3
III A	3.2	4	4	3	4	2.1
III B	2.5	5	5	3	5	1.7
IV A	2	6	6	4	6	1.6
IV B	1.8	8	8	0		0
<b>Ponderado</b>	<b>17.3</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>2.00</b>	<b>3.00</b>	

A partir de estas tablas se ha determinado los índices de consumo por metro lineal de avance y la cantidad de elementos de sostenimiento a utilizar, tal como lo muestra la tabla 26.

Tabla 26: Índice de consumo de los elementos de sostenimiento (uni/mt)

Elementos de sostenimiento	Unidad	Túnel	Cámara	Refugio	Desquinche	P.U - US\$/uni
Shotcrete	m3/mt	1.59	1.16	0.58	1.29	140.00
Acelerante de concreto master SA160	gln/mt	7.93	16.38	3.25	7.93	7.74
Pernos helicoidales 10ft-1"	pza/mt	5.00	5.00	2.00	4.00	14.50
Resina epoxica liquida	car/mt	10.00	10.00	4.00	8.00	1.00
Cartucho cembolt	car/mt	45.00	45.00	18.00	36.00	0.35
Pernos spli set 1-1/2"x7ft	pza/mt	4.00	4.00	0.00	3.00	8.84
Malla electrosoldada	m2/mt	12.50	8.00	0.00	12.50	2.52
Mini spli set 2ft	pza/mt	5.00	3.00	0.00	5.00	4.60
Cimbra 5.5x5.5	pza/mt	0.14	0.00	0.00	0.14	600.00
Plancha acalanada 1x1.5	pza/mt	2.21	0.00	0.00	2.21	55.20
Redondos 6*10"	pza/mt	6.16	0.00	0.00	6.16	9.20
Bolsacreto	uni/mt	80.00	0.00	0.00	80.00	0.50

El anexo 07, muestra el detalle de los índices de consumo de los elementos de sostenimiento (cimbras, pernos, malla, entre otros) a necesitar así como el costo unitario.

#### 3.5.4.5. Carguío y acarreo

El desmonte producto de la rotura del frente, será traslado a una cámara de almacenamiento y carguío, ubicado uno del otro 200.00 metros, esto debido al rendimiento óptimo del equipo scoop de 6.0 yd<sup>3</sup>, el cual se muestra en la

tabla 27. La decisión de la distancia entre cámara y cámara, también obedece a la normativa (D.S 055-2010-EM), el cual establece dejar pases para el traspase de los vehículos pesados.

#### 3.5.4.5.1. Análisis del tiempo de carguío

En base a operaciones similares de la misma corporación, se analizado al equipo de carguío para el escenario constructivo del Proyecto Túnel de Integración, el cual será de exclusividad, es decir, su única labor será el frente de avance del túnel.

Tabla 27: Parámetros de tiempo y propiedades del macizo

<b>Tipo de roca:</b>	<b>Volcánico</b>	<b>Unidad</b>
Densidad del material:	2.70	ton/m <sup>3</sup>
Factor de esponjamiento:	40%	%
Densidad esponjada:	1.93	ton/m <sup>3</sup>
Humedad:	5%	%
Densidad aparente:	1.98	ton/m <sup>3</sup>
Velocidad cargado:	5.00	km/hr
Velocidad vacío:	10.00	km/hr
Variación distancia:	20.00	mt
Factor de llenado de la cuchara:	0.90	%
Tiempo de carguío:	2.00	min
Tiempo de descarga:	1.00	min
Tiempo en maniobras:	1.00	min
Tiempo de espera:	0.50	min
Altura:	5.50	mt
Base:	5.50	mt
Avance efectivo	3.19	mt
Sobre excavación	10%	%

Tomando la hoja técnica del equipo y considerando los tiempos ida, retorno, carga, descarga y otras demoras operativas e inoperativas, se ha podido determinar los rendimientos en ton/hr. La tabla 28 muestra el análisis realizado al equipo de acarreo y carguío y su rendimiento para los diferentes recorridos propuestos del proyecto. El anexo 08 detalla el rendimiento del scoop de 6.0yd<sup>3</sup> en función a la distancia.

Tabla 28: Rendimientos en Ton/hr según la distancia

<b>Simulación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Distancia - Metros</b>	<b>Rendimiento Ton/hr</b>
D01	Hasta	20.00	100.85
D02	Hasta	40.00	96.21
D03	Hasta	60.00	92.02
D04	Hasta	80.00	88.22
D05	Hasta	100.00	84.74
D06	Hasta	120.00	81.56
D07	Hasta	140.00	78.62
D08	Hasta	160.00	75.91
D09	Hasta	180.00	73.39
<b>D10</b>	<b>Hasta</b>	<b>200.00</b>	<b>71.05</b>
D11	Hasta	220.00	68.86
D12	Hasta	240.00	66.82
D13	Hasta	260.00	64.90
D14	Hasta	280.00	63.10
D15	Hasta	300.00	61.40
D16	Hasta	320.00	59.79
D17	Hasta	340.00	58.28
D18	Hasta	360.00	56.84
D19	Hasta	380.00	55.48
D20	Hasta	400.00	54.19

#### 3.5.4.6. Transporte

La producción de desmonte del Proyecto Túnel de Integración ha sido calculado en BCM a una densidad de 2.70 kg/m<sup>3</sup>, dicho material será

trasladado desde las cámaras de almacenamiento y carguío a la desmontera Huaripampa ubicada a 10km del túnel. También tenemos la opción de trasladarlo a la Relavera Rumichaca para que sirva como material de la construcción del dique de arranque ubicado a 6.0km de la boca túnel. La tabla 29 muestra la producción de desmote por etapa y fase de construcción.

Tabla 29: Toneladas de desmote por labor

<b>Etapa</b>	<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>
01	Túnel	ton	283,820.63
01	Cámara	ton	19,440.00
01	Refugio	ton	1,339.20
01	Desquinche	ton	39,300.53
02	Túnel	ton	409,110.08
02	Cámara	ton	27,000.00
02	Refugio	ton	1,684.80
Total		ton	781,695.23

#### 3.5.4.6.1. Análisis del transporte

Tomando como base el análisis del equipo scoop y sus rendimientos en el carguío y acarreo del desmote, se ha determinado los rendimientos del sistema de transporte por volquetes para el Proyecto Túnel de Integración el cual se muestra en la tabla 30.

Tabla 30: Rendimiento del volquete

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>
Distancia	km	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00
Velocidad cargado	km/hr	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Velocidad vacío	km/hr	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Tiempo de carguío	min	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Tiempo de ida	min	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00
Tiempo de retorno	min	10.00	20.00	30.00	40.00	50.00
Tiempo de descarga	min	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Otras demoras	min	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
<b>Ciclo completo</b>	<b>min</b>	<b>39.00</b>	<b>69.00</b>	<b>99.00</b>	<b>129.00</b>	<b>159.00</b>
Ciclo completo	hrs	0.65	1.15	1.65	2.15	2.65
Densidad LCM	ton/m3	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98
Capacidad tolva	m3	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Factor de llenado tolva	F	90%	90%	90%	90%	90%
Capacidad tolva	ton	26.71	26.71	26.71	26.71	26.71
Capacidad cucharon	m3	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56
Factor de llenado cucharon	F	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Capacidad cucharon	ton	8.57	8.57	8.57	8.57	8.57
Numero de pases	Pas	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Rendimiento-Volquete	Ton/hr	41.09	23.23	16.19	12.42	10.08

En el anexo 09 se muestra el detalle del análisis del sistema de transporte, cálculo de su rendimiento en Ton/hr para diferentes distancias de acarreo.

### **3.6 OBRAS CIVILES**

Para la construcción del Proyecto Túnel de Integración, será necesario realizar obras civiles antes de iniciar con el proceso de excavación, esto debido a que existen actividades de infraestructura y de energía previas, que deberán ser ejecutadas antes de iniciar con la construcción.

Entre las obras a desarrollar, están la construcción de losas para la subestación eléctrica del proyecto, la construcción de la plataforma para el acopio de nuestros recursos (elementos de sostenimiento, equipos eléctricos, contenedor para logística, entre otros), también es necesario construir una poza para el almacenamiento de agua a usar en las operaciones, losas para nuestros campamentos, casetas para el resguardo de la compresora, cabinas de ventilación, cunetas para la derivación de las aguas a la planta de tratamiento, base para el pararrayos y toda obra de servicios para continuar e iniciar con el proceso constructivo del Proyecto Túnel de Integración.

Las obras civiles serán tercerizadas y culminadas en el lapso de 2 meses, tiempo en el que se debe de tener todos los sistemas antes mencionados y así poder reabrir la construcción del Túnel. Cabe recalcar que dentro de los trabajos de infraestructura esta la construcción de la base para el sistema de ventilación principal, la construcción de refugios según la normativa vigente, la construcción de cámaras de almacenamiento y carguío y las cámaras para la subestación secundaria así como la cámaras de rescate.

### 3.6.1 Obras civiles previas

Antes de iniciar con el proceso constructivo del proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra, San Cristobal y Anndaychagua, debemos de realizar obras civiles previas que nos permitan tener las condiciones necesarias y suficientes para iniciar la excavación de la misma. Dicha infraestructura nos permitirá cumplir con los avances programados en el tiempo dado. El plano TES-PTI-2015-IB-009, detalla las facilidades del proyecto en mención.

#### 3.6.1.1 Construcción de losas

Dentro del área de influencia del proyecto (0.5km<sup>2</sup>), deberán de construir losas de concreto de dimensiones variables para los siguientes componentes:

- ❖ Losas para las oficinas generales.
- ❖ Losas de base para los equipos (compresora, grupo electrógeno, ventiladores)
- ❖ Losas para la subestación principal del proyecto.
- ❖ Losas para la cámara de bombeo.
- ❖ Losas para las cámaras de las subestaciones eléctricas.

### 3.6.1.2 Instalación de postes

Debido a que la energía será dada en la subestación principal de la planta concentradora victoria, se hace necesario trasladar dicha energía (4.16Kv) mediante postes aislantes (madera) a la subestación eléctrica del proyecto. El trabajo debe ser realizado paralelamente al de construcción de losas y deberá tener un horizonte de 30 días como máximo. Esta actividad también será tercerizada bajo la supervisión de los ingenieros encargados del proyecto.

### 3.6.1.3 Construcción del taller de mantenimiento

Para cumplir con el horizonte del proyecto y con el cronograma de avances, es necesario construir un taller de mantenimiento exclusivo para los equipos pesados, dicho taller deberá de contar con las necesidades básicas y así poder tener los equipos siempre a disponibilidad de la operación. La construcción deberá tercerizarse y ser ejecutada en un plazo no mayor de 45 días.

### 3.6.1.4 Construcción del sistema industrial de agua

El agua deberá ser trasladada desde la quebrada chumpe, esto mediante la construcción de una poza en la cabeza o sumidero y traslada por tuberías de 4 pulgadas, no se utilizarán bombas a cambio de ello se aprovechara la gravedad (desnivel de 100.0 metros) hacia la bocamina del proyecto. La tubería deberá ser enterrada con la construcción de zanjas, esto para no

congelarla durante épocas de heladas. Así mismo deberá de construirse en la cabeza un desnivel que permitan dejar el lodo en el fondo y solo trasladar agua.

#### 3.6.1.5 Construcción de cunetas

El proceso constructivo del Túnel, las condiciones climatológicas y el lavado de equipos en general, producirán grandes cantidades de agua (aproximadamente  $8\text{m}^3/\text{día}$ ), para derivar dichas agua a la planta de tratamiento de la planta victoria, es necesario construir un sistema de alcantarillado (cunetas) de  $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 30\text{cm}$ , esto con el único fin de no dificultar las operaciones del día a día y generar menor impacto al medio ambiente.

#### 3.6.1.6 Cámaras de almacenamiento y carguío

El D.S 055-2010 EM, establece que en el avance de labores horizontales de desarrollo de una mina debe cumplirse que en tramos de 150-200 metros deben construirse accesos laterales adicionales del ancho del vehículo más grande de la mina para facilitar el pase de dichos vehículos de ida y vuelta. Así mismo hemos determinado el ciclo óptimo del equipos scoop de  $6.0\text{ yd}^3$  en 200 metros como máximo dando como resultado un tiempo óptimo en el acarreo del mismo. Por tal motivo se ha diseñado la construcción las cámaras de almacenamiento y carguío en tramos de cada 200 metros y serán

construidas de tipo delta o “Y”, de esta manera cumpliremos con la parte operativa del proceso constructivo y con la normativa vigente. El detalle de construcción de la cámara de almacenamiento y carguío se encuentra especificado en los planos de estándares operativos de construcción.

#### 3.6.1.7 Refugios

Los refugios deben ser construidos en toda labor de desarrollo de una operación minera y por ende en el Proyecto Túnel de Integración, según la normativa vigente dichas labores deben estar separadas 50 metros una de la otra, dentro del diseño he considerado la construcción de refugios de 2.0x2.0x2.0. Conforme se avance, el último refugio cercano al frente, servirá de nicho para la caja break de avance del jumbo.

#### 3.6.1.8 Cámaras de subestación eléctrica.

En base a los cálculos de demanda de energía, equipos, ciclos constructivos y actividades diarias, las subestaciones deberán construirse cada 400 metros una de la otra, ahora como dentro del programa construiremos cámaras de almacenamiento cada 200 metros, dicha cámaras será ocupada para la subestación eléctrica secundaria y de esta manera nos permitirá generar un ahorro en la construcción. Cabe recalcar que las cámaras de la subestación deben tener un sostenimiento pesado (malla, perno y shotcrete) y con un acabado que nos permita realizar las obras civiles y eléctricas de instalación.

Los anexo 10 y 11 detallan el balance de la energía y la necesidad del mismo conforme se avance la construcción del Túnel de Integración.

#### 3.6.1.9 Cámaras de rescate

Será construida a los 2.0km de la bocamina y cumplirá la función de servir como plan de contingencias ante eventos no deseados de atrapamiento o derrumbes del proyecto, dicha cámara deberá de contener los medicamentos básicos, agua, frazadas, oxígeno, camillas tablas entre otros para sobrevivir y dar tiempo al rescate del personal atrapado.

### 3.6.2 Frentes de trabajo

Como se indica en el plano TES-PTI-2015-IB-003, el Proyecto Túnel de Integración en su primera etapa será construida por 02 frentes de avance el cual tendrá su propio equipo de trabajo y este será de manera exclusiva. Por lo tanto la construcción del proyecto será de forma simultánea.

#### 3.6.2.1 Etapa 01

La etapa 01, tendrá una duración de 14.00 meses a partir de iniciada la construcción del Proyecto Túnel de Integración. La construcción de realizará en la zona de influencia de las minas Car – SCR y tendrá una longitud de

4,212.00 metros, será construida por 02 frente de trabajo y en dirección al encuentro. La pendiente de ambas fases constructivas es de 0.3%. Una vez finalizada la construcción y acabados, la mina carahuacra podrá utilizar este medio como vía de transporte de todo su mineral hacia la planta Victoria.

#### 3.6.2.1.1 Frente 01 - SE

Por este frente se desarrollará la excavación y el sostenimiento del Túnel, con ingreso en el punto TIO (portal de entrada o Bocamina), con una dirección sensiblemente paralela al actual túnel Victoria, la pendiente de dicha labor será de 0.3% positiva. El desarrollo de los trabajos de excavación por este frente se estima aproximadamente en 14 meses, tiempo en el cual debe de encontrarse con el frente 02. En este tramo será necesario excavar cámaras de carguío, refugios para el personal, estaciones para re-bombeo de agua, cámaras de subestación eléctrica y cunetas para drenaje. El sostenimiento se irá ejecutando paulatinamente con el avance de la excavación, en la medida que se vayan presentando zonas que así lo requieran.

#### 3.6.2.1.2 Frente 02 - NW

He considerado que se tomarán las mismas técnicas y procedimientos señalados para la excavación por el frente 01. Aun cuando por este frente intersectemos labores antiguas que podrían atrasar el avance y generar un incremento de su horizonte. El equipo del frente 02, iniciará los trabajos de

excavación en la zona de lidia del Nv820 – Xc 387, para lo cual se debe ingresar por la Rampa Huaripampa recorriendo unos 2,072 km con pendiente negativa de 0.3% al encuentro del frente 01. Por el frente 02, deberán efectuarse las operaciones de excavación, limpieza, transporte de escombros, hasta su contacto con el frente 01 en la progresiva +3,057.

### 3.6.2.2 Etapa 02

La etapa 02, tendrá una duración de 23.00 meses y también será construida por 02 frentes de trabajo y en dirección al encuentro. Su longitud total es de 5,009.00 metros y tendrá una pendiente de 0.3%. El tiempo es mayor debido a las condiciones del macizo rocoso, motivo por el cual se estima un avance promedio de 90 metros por mes. Finalizada la construcción y los acabados, el mineral de las minas San Cristóbal y Andaychagua podrá ser transportado por este medio.

#### 3.6.2.2.1 Frente 01 - SE

Por este frente se continuara con la constricción del Xc 387, ejecutado en la etapa 01, el avance será a frente ciego en dirección a la mina San Cristóbal Xc-810, esto permitirá no dificultar a las operaciones unitarias de la operación. La pendientes será positiva de 0.3% y tendrá una longitud de 2,979.0 metros hasta el encuentro con el segundo frente, al finalizar la

intersección con el Xc-810, el cual se dará dentro de 6 meses, el mineral de San Cristóbal podrá ser transportado por este medio hasta planta Victoria.

#### 3.6.2.2.2 Frente 02 - SW

El inicio del frente 02, está ubicado en la mina Andaychagua, Bp 770 del nivel 4230 msnm, tendrá una longitud de 2030 metros, será construida en 23 meses y en dirección al encuentro. La pendiente de dicha ejecución será negativa a 0.3%. La dirección será al encuentro del frente 01 y ocurrirá en la progresiva +10,070.00.

### 3.6.3 Estándares operaciones

Cada labor a construir, tiene un estándar operativo, el cual detalla la parte técnica y la forma de construir dichas labores. Así mismo se ha diseñado en base al estudio geomecánico la forma de instalación de los elementos de sostenimiento, el cual es un estándar en la corporación Volcan. Cada labor a construir tiene su estándar operativo, representada a través de su sección transversal, en los planos de estándares operativos muestro las secciones de todas las labores a excavar, así como los elementos de sostenimiento aplicar.

### **3.6.4 Componentes del proyecto**

El en área de influencia del proyecto tenemos componentes ambientales, los cuales deben de ser monitoreados para cumplir con la normativa vigente y así no tener observaciones ante fiscalizaciones OEFA principalmente. Dichos componentes han sido trabajado y coordinados con el área de medio ambiente de la unidad. Los componentes del proyecto son:

- ❖ Oficinas generales
- ❖ Subestación eléctrica
- ❖ Taller de mantenimiento
- ❖ Plataforma temporal

### **3.6.5 Cronograma de actividades del proyecto**

Antes de continuar e iniciar con la excavación de los frentes 01 y frente 02, es de vital importancia concluir con las obras civiles básicas de servicio. Las figuras 22 y 23 muestran las actividades que se realizarán para complementar al proceso constructivo del Túnel de Integración. De la misma manera se ha programado la llegada de los equipos para la construcción del Proyecto Túnel de Integración. Dicho cronograma aplica para las etapas 01 y 02 cuando inicien su traslado hacia las minas. El anexo 12 detalla el cronograma de actividades a realizar antes de proceder con la construcción del Proyecto túnel de Integración.

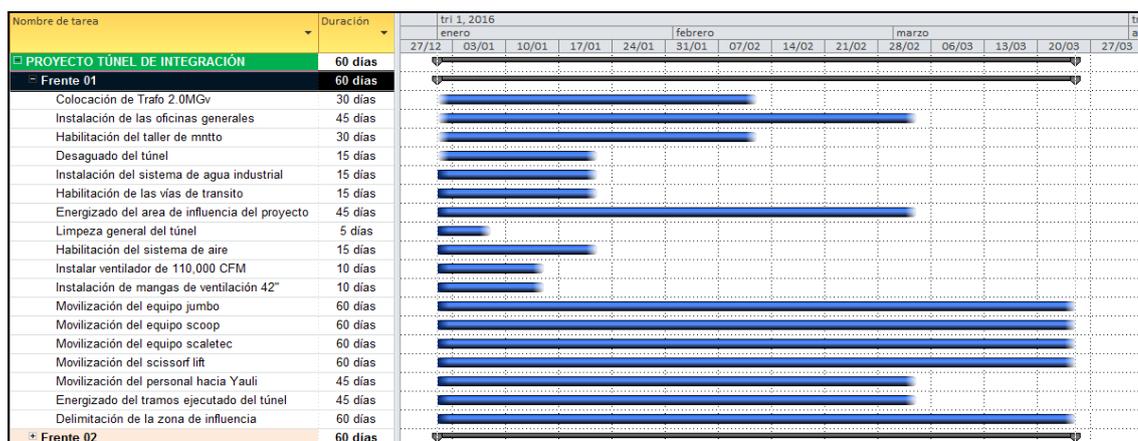


Figura 22: Cronograma de actividades del frente 01

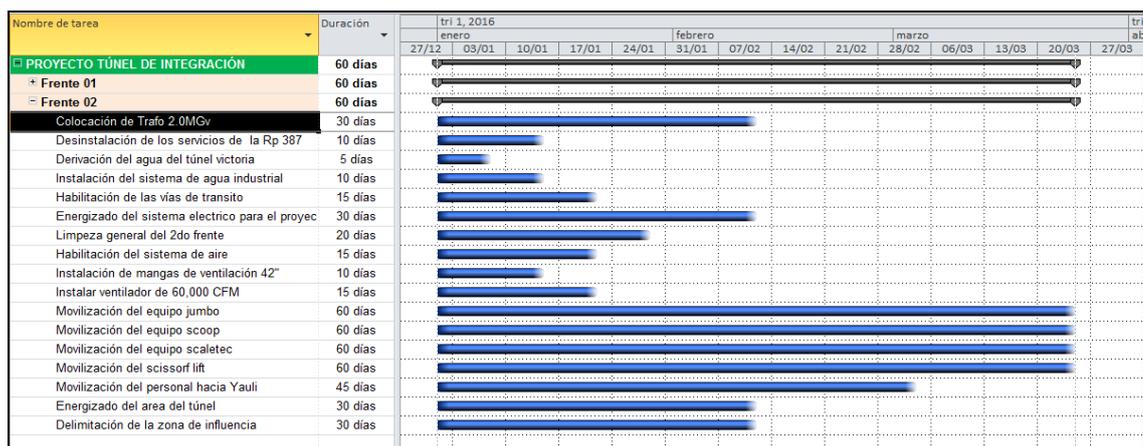


Figura 23: Cronograma de actividades del frente 02

### **3.7 SERVICIOS**

Parte de toda operación de construcción de túneles necesita del recurso agua y aire para el proceso de excavación, con ese fin he realizado un cálculo detallado del consumo de agua y la necesidad de aire comprimido para los fines del proyecto Túnel de Integración durante su horizonte.

La toma de agua será desde la quebrada Chumpe ubicado a 3 kilómetros y a 100.00 metros de la Boca Túnel, mediante un sistema de tuberías de 4" HDPE trasladaremos y abasteceremos de agua a la operación para las diferentes actividades del proceso constructivo.

Dentro de las actividades de construcción, existen actividades que necesitaran de aire comprimido como es el caso del lanzado de Shocrete, perforaciones convencionales y aire comprimido en caso sea necesario a falta del sistema de ventilación. Para poder abastecer de aire comprimido a la operación he determinado la capacidad y características de una compresora para los fines antes mencionados. El traslado de aire comprimido también se realizara mediante tubería de 4"HDPE. Por ultimo tenemos actividades de estandarización como son el colocado de alcayatas, instalación de iluminación a los largo del túnel, colocación de líneas para la manga de ventilación, construcción de cunetas y desagüe de aguas del túnel.

### 3.7.1 Objetivos

- ❖ Definir el sistema de agua industrial.
- ❖ Definir el sistema de aire comprimido.
- ❖ Presentar el diagrama unifilar de los sistemas de agua y aire.
- ❖ Calcular los índices operativos de dichos sistemas.

### 3.7.2 Sistema industrial de agua

Para diseñar un sistema industrial de agua del Proyecto Túnel de Integración, se prepara un balance de aguas, identificando las fuentes y cantidad de agua para extraer por las tuberías de drenaje mediante el uso de bombas hacia la cámara de bombeo o por las cunetas del túnel. Según el clima y la geografía, ingresa más agua en meses lluviosos que en el estiaje. Según la experiencia se ha demostrado que las fuentes de ingreso de agua son como se muestra en la tabla 31.

#### 3.7.2.1 Consumo de agua

La predicción anticipada del flujo de agua en la construcción de un túnel la hacen los Hidrólogos. Se parte de los conceptos usados en el estimado del rendimiento de taladros de perforación del frente. La predicción de agua en un túnel es difícil porque el flujo es a través de grietas irregulares y fisuras en

la roca; por consiguiente no se predice con exactitud. Los cálculos para aplicación requieren experiencia de la operación. Línea base de los cálculos.

Tabla 31: Balance de agua en el Proyecto Túnel de Integración

(USGPD: Galones americanos por día)

Descripción	Ingreso	Salida
<b>1.0 Agua subterránea</b>		
Filtraciones del macizo rocoso	4,500.00	
<b>2.0 Agua colectada para servicios</b>	-	3,500.00
<b>3.0 Agua Servicios</b>		
Perforación	2,000.00	
Control de polvo	1,500.00	
Lavado	1,000.00	
Enfriadores	-	
Fugas en tuberías	100.00	
<b>4.0 Diesel-Escapes</b>		
Flota trackless	100.00	
<b>5.0 Desmante (humedad 3%)</b>	-	500.00
<b>6.0 Lamas de la mina</b>	-	300.00
<b>7.0 Ventilación -Evaporación/Condensación</b>	-	100.00
<b>8.0 Cámara de Bombeo Principal-Túnel</b>	-	4,800.00
<b>Total</b>	<b>9,200.00</b>	<b>9,200.00</b>

En rocas porosas puede estimarse perforando huecos y midiendo su caudal. Normalmente las pruebas de presión en agujeros perforados dan una idea de la magnitud del flujo anticipado, pero en numerosos casos las estimaciones resultan equivocadas. Como regla, la estimación exacta del flujo de agua del terreno en un túnel sólo puede obtenerse ingresando a la operación para ver el

flujo en las paredes o cunetas (También es aplicable la perforación de lloronas para medir la filtración de las aguas). La medida de cantidades pequeñas de agua se hace más fácilmente llenando un balde o cubo de volumen conocido (por ejemplo, un balde de 5 galones). La medida de flujo en un tubo abierto horizontal puede determinarse midiendo la distancia de la caída de la corriente de agua. Si la distancia medida a dónde cae la corriente es 4 pulgadas (100 mm), el flujo puede obtenerse de la Tabla 32 siguiente (flujo en USGPM para tubería Schedule 40).

$$1 \text{ m}^3/\text{min} = 16.67 \text{ lt/s} = 35.3 \text{ CFM} = 264 \text{ USGPM}$$

$$1 \text{ lt/s} = 15.85 \text{ USGPM}$$

Tabla 32: Medida del flujo de agua USGPM – regla práctica

Distancia Horizontal	6"	8"	10"	12"	14"	16"
Diámetro de Tubería	Medida del Flujo (USGPM)					
1½"	20	27	33	40	46	53
2"	33	44	55	66	77	88
3"	72	96	120	145	169	193
<b>4"</b>	<b>124</b>	<b>166</b>	<b>207</b>	<b>249</b>	<b>290</b>	<b>332</b>
6"	283	377	471	565	659	753
8"	500	667	834	1,001	1,167	1,334
10"	798	1,064	1,330	1,596	1,861	2,127

USGPM =Galones Americanos por Minuto, para diferenciarlos de los Galones Imperiales (Ingleses).

1 Galón Americano = 0,833 Galones Imperiales (Ingleses).

1 Galón Imperial = 1, 201 Galones Americanos (US Galons).

La cantidad ( $Q$ ) o caudal de agua que fluye hacia arriba, de un hueco que ha sido perforado verticalmente hacia abajo, puede estimarse midiendo la altura del flujo ( $H$ ) sobre el cuello del hueco.

$$Q = 5.1 * D^2 * H^{1/2}$$

Donde:

$D$  : Diámetro del hueco en pulgadas (pulgadas)

$H$  : Altura del flujo (pulgadas)

$Q$  : Flujo en USGPM

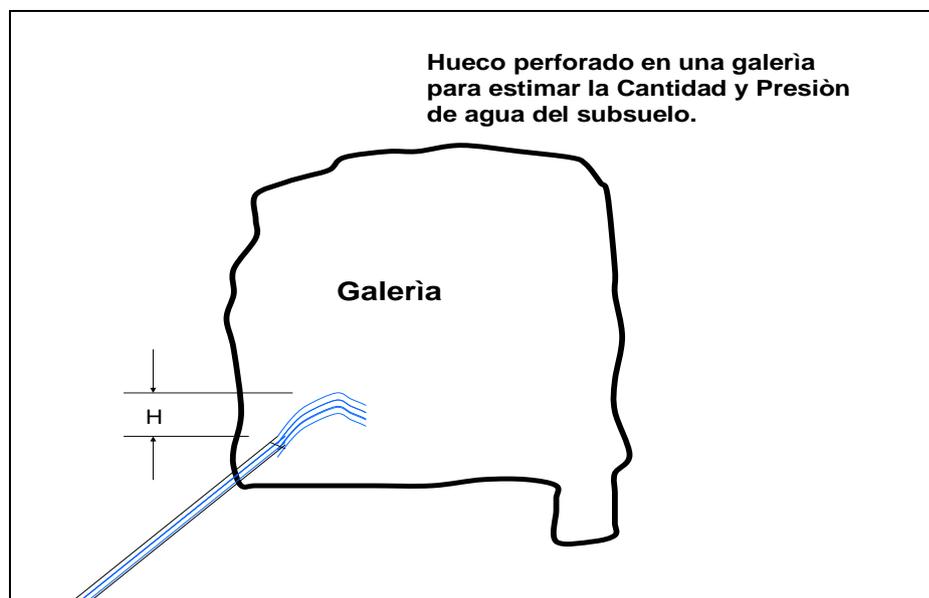


Figura 24: Esquema del cálculo del caudal  $Q$  en una cuneta

La medida del flujo de un hueco perforado verticalmente hacia abajo (hueco tapón,) puede determinarse rápidamente midiendo la altura del flujo,

comparándola con los datos de la Tabla 33 siguiente. El caso es aplicable cuando se realizan perforaciones diamantinas.

Tabla 33: Flujo de un hueco de 1.38” de diámetro

H, pulgadas	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2	3	6	12
Q, USGPM	4.9	6.9	8.4	9.7	12	14	17	24	34

### 3.7.2.2 Cunetas

El flujo de agua de una cuneta típica de mina puede medirse con un vertedero portátil hecho de madera o de metal. Una caja de 3 pies tiene el largo suficiente para los flujos de las cunetas típicas. Si el vertedero se extiende transversal a todo el ancho de la caja y la caja se pone a nivel en la cuneta, la cantidad del Flujo (en USGPM) puede determinarse usando la siguiente formula:

$$Q = 3 * b * H^{1.5}$$

Dónde:

b: es el largo en pulgadas del vertedero (ancho de la caja),

H: es la altura (head) medida en pulgadas bien atrás de la cresta del vertedero.

Q: es el Flujo (o caudal), en USGPM (Galones Americanos por Minuto).

La velocidad del agua que fluye en una cuneta rectangular grande de sección uniforme puede ser determinada por un objeto flotando al medio de la corriente en una distancia determinada. La velocidad media será 74% de este valor para una cuneta en roca y 88% para una cuneta recubierta de concreto liso. El área es el ancho de la cuneta por la profundidad mojada. La cantidad (flujo) es el producto de la velocidad y del área medida. Este último caso fue aplicado al Proyecto Túnel de Integración, determinando que el caudal de agua es de:

Tabla 34: Calculo de las filtraciones de agua en el Túnel de Integración GPM

<b>Aplicación</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Ancho	mt	0.270
Alto	mt	0.150
Velocidad	mt/seg	0.200
Caudal	m3/seg	0.008
Caudal	m3/min	0.486
<b>Caudal</b>	<b>GPM</b>	<b>128.30</b>

Los valores calculados se aproximan a la tabla 34. Por tanto son válidos los reportes de experiencia de otras operaciones similares.

### 3.7.2.3 Desagüe por el túnel

En terreno montañoso o accidentado, los túneles de drenaje son una alternativa económica al bombeo. Los túneles especiales para desagüe se

hacen por debajo de toda operación minera. La pendiente es superior a la normal para el tránsito con rieles 1% es típico y 1.5% se considera un máximo. Para construirlo se incorpora una cuneta grande en un lado, de 3 pies por 3 pies, o 1m por 1m. Una vez terminado el túnel se usa toda su sección del túnel para el flujo de agua. Este análisis es el típico del Túnel Victoria. Cabe recalcar que una vez construido el Túnel de Integración, El Túnel Victoria quedará de forma exclusiva para drenaje de las minas CAR – SCR.

La verificación con el Número de Froude confirma que estas cunetas no experimentarán salto hidráulico. La capacidad, **Q**, de la cuneta puede determinarse entonces simplemente modificando la fórmula de Manning.

$$Q = 25,000 * \frac{A^{5/3} * S^{0.5}}{P^{2/3}}$$

Dónde:

A : es área m<sup>2</sup>

S : es la gradiente del túnel, m

P : es el perímetro húmedo. m

Q : m<sup>3</sup>/seg

La fórmula en este caso asume un coeficiente de rugosidad, **n = 0.04**; Para una sección y profundidad de flujo, fija, la ecuación se simplifica a

$$Q = k * S^{1/2}$$

Donde:

K: es una constante igual a 11.3737

La tasa del flujo es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la gradiente. La siguiente tabla puede usarse para determinar la capacidad de una cuneta estándar de 1m x 1m = 1m<sup>2</sup> de un túnel de drenaje que fluye llena al 95% a diferentes gradientes. La tabla 35 debe ser tomado en cuenta por si existen cambios en la ingeniería de construcción del Túnel de Integración, es decir, existe la posibilidad de realizar una cortada con dirección al Túnel Victoria, de manera que derivemos las aguas por dicha labor en cualquier progresiva del Túnel de Integración.

Tabla 35: Capacidad estándar de la Cuneta en un Túnel de Drenaje

<b>Gradiente Para una cuneta de 1.0 m<sup>2</sup></b>	<b>Capacidad (lt/s)</b>	<b>Capacidad (USGPM)</b>
0.50%	800	12,680
0.75%	980	15,530
1.00%	1,131	17,933
1.25%	1,265	20,049
1.50%	1,386	21,963

1 Litro/segundo = 15,85032317 Galones americanos /minuto (USGPM)

La capacidad de una cuneta cortada en la roca puede más que duplicarse si se reviste con concreto (**coeficiente de rugosidad, n =0.014, en este caso**). En

el caso de una cuneta de sección cuadrada revestida en concreto, la siguiente formula puede usarse para tener resultados satisfactorios.

$$Q = 70,000 * \frac{A^{5/3} * S^{0.5}}{P^{2/3}}$$

Dónde:

S : Gradiente del túnel, mt

P : Perímetro húmedo mt

#### 3.7.2.4 Bombeo de agua

Debido a que el volumen de agua subterránea será grande (8-10m<sup>3</sup>-disparo), he planificado construir una cámara de bombeo en la progresiva +500, +1,500, +3,000 y +4,500 de manera que las lamas del agua turbia se depositen y solo salga agua transparente por la boca túnel. Para este servicio se emplean bombas centrífugas de agua sucia (Dirty, Water, Pumps) diferentes a las bombas de barro centrífugas de las concentradoras dónde las partículas están finamente molidas. En estas bombas de baja altura se usan revestimientos de caucho natural, neopreno, poliuretano, etc.

En cambio, las bombas centrífugas para desaguar minas profundas requieren superficies de desgaste duras, de metal resistente a la abrasión. Las partículas densas causan más desgaste, las angulares causan el doble de desgaste que las redondeadas, hasta un 10%. El desgaste es casi directamente proporcional a la

concentración de finos, es menor cuando el agua es más clara. En el caso de mucha altura y volúmenes pequeños, se usan bomba de diafragma de pistón.

Para el caso del Proyecto Túnel de Integración, el agua se reúne en un sumidero pequeño para facilitar la agitación y proporcionar un volumen de los sólidos constante. La bomba de diafragma de pistón tiene capacidad de altura (head) bastante alta para bombear hasta la salida del boca túnel y a partir de ahí derivar las aguas a la planta de tratamiento victoria. El gasto de mantenimiento para estas bombas es bajo y está dentro del P.U del contratista.

#### 3.7.2.5 Selección de bombas

La bomba centrífuga se describe por el diámetro de la salida. El tamaño de la bomba se describe por la velocidad de salida, que puede determinarse por la siguiente ecuación.

$$Q = A * V$$

Donde:

Q : Cantidad de flujo en CFS ( $m^3/s$ )

V : Velocidad Promedio en FPS (m/s)

A : Área Verdadera de la salida de la bomba  $ft^3 (m^3)$

Tabla 36: Área verdadera de salida

Tamaño Estándar (pulgada)	Área Verdadera de Salida (ft <sup>2</sup> )	Área Verdadera de Salida (m <sup>2</sup> )
1	0.0060	0.0006
1 ¼	0.1040	0.0097
1 ½	0.0141	0.0013
2	0.0232	0.0022
2 ½	0.0333	0.0031
3	0.0513	0.0048
3 ½	0.0686	0.0064
4	0.0884	0.0082
5	0.1390	0.0129
6	0.2006	0.0186
8	0.3474	0.0323
10	0.5475	0.0509
12	0.7773	0.0722
14	0.9394	0.0873
16	1.2272	0.1140

- ❖ Si la velocidad de salida es más de 15 ft (4.6 m/s), la bomba es muy pequeña.
- ❖ Si la velocidad de salida es menos de 10 ft (3.0m/s), la bomba esta sobre diseñada y sobre dimensionada.

Procedimiento:

- Nos damos un Flujo Q, por ejemplo: 100 lts/seg.

- Escogemos una bomba, por ejemplo de 5 pulgadas, que tiene una área de 0.01291 m<sup>2</sup>.
- Entonces la velocidad es:
- 

$$\frac{\left(100 \frac{\text{lt}}{\text{s}}\right) * (0.01291 \text{m}^2)}{1000 \text{ lt/m}^3} = 19.365 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Lo que es demasiada velocidad.

- Escogiendo una bomba de 8 pulgadas con un área de salida de 0.03227m<sup>2</sup>, entonces:

$$\frac{\left(100 \frac{\text{lt}}{\text{s}}\right) * (0.03227 \text{m}^2)}{1000 \text{ lt/m}^3} = 3.099 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Lo que estaría bien, para los fines propuestos.

### 3.7.2.6 Eficiencia de la bomba

La eficiencia de la bomba depende de la velocidad específica (N<sub>s</sub>) de su impulsor:

$$\mathbf{N_s = N * Q^{0.5} * H^{3/4}}$$

Donde:

Q : Flujo (cantidad)

H : Cabeza de Fricción Total

N : RPM del Impulsor

La fórmula es válida para unidades métricas o imperiales. El Flujo, Q se expresa en USGPM en muchos catálogos; sin embargo, usando en lugar CFS (pies cúbicos por segundo) produce valores más simples de usar y no causan confusión entre los galones americanos (USGalons) y los Galones Imperiales.

$$N_s(\text{USGPM}) = 17.66 * N_s(\text{CFS})$$

La mayoría de las bombas tienen acoplamiento directo a un motor de inducción, así es que N debe ser la velocidad razonable de un motor Standard tal como 3,450 RPM (usualmente bombas pequeños y/o temporales solamente), 1,750- RPM, o 1,160-RPM. Para servicio del Túnel de Integración, los cálculos revelan que las velocidades más altas son más eficientes (y los motores más rápidos son más baratos).

- Para la mayoría los túneles y minas, la bomba será más eficiente si el  $N_s$  (unidad de CFS para Q) está entre 100 y 200.
- Si el cálculo de  $N_s$  (CFS) es menor de 50 – seleccione cuantas bombas de menor tamaño se requieran para que la velocidad específica de cada una exceda 50 (bombas Mult.-etapa en serie).

- Si la velocidad específica (CFS) está entre 50 y 200, seleccione una sola bomba centrífuga.
- Si la velocidad específica (CFS) está sobre 200 y menos que 400, se pueden emplear dos bombas centrífugas en paralelo.

Las siguientes formulas pueden usarse para calcular los HP requeridos del motor con la eficiencia determinada de la tabla de velocidad específica anterior o de Tablas de los fabricantes de bombas.

$$\mathbf{HP = \frac{Q * W * H}{550 * E}}$$

Donde:

Q : Flujo (cfs)

W : 62.4 lbs por pie cúbico (para agua clara)

H : Total Altura (head) en pies

E : Eficiencia de la Bomba

$$\mathbf{HP = \frac{Q * H}{3960 * E}}$$

Donde:

Q : Flujo (USGPM)

W : 62.4 lbs por pie cúbico (para agua clara)

H : Total Altura (head) en pies

E : Eficiencia de la Bomba

NOTA: La siguiente Formula ( $Q=$  lts/seg y  $H$  en metros) es utilizada por la empresa Hidrostral S.A., para calcular los HP necesarios en de manera rápida y sencilla.

$$\mathbf{HP} = \frac{\mathbf{Q * H * E}}{\mathbf{75}}$$

Ejemplo:

Siendo la eficiencia 75%,  $(200\text{lt/seg} * 200\text{mt} * 75\%) / 75 = 458 \text{ HP} \times 0.75 = 343.5 \text{ kW}$ .

Usando la fórmula de Hidrostral para un flujo de 250 lts/segundo determinamos que si el Proyecto Túnel de Integración desagua 250 lts/segundo de agua, para bombearlo 700 metros de altura se gasta US\$ 2'044,000 por año. Si se puede hacer un Túnel de desagüe de 4 kilómetros que cuesta US\$ 3'700, 000, es preferible construir el túnel de inmediato. Los resultados se pueden ver en la tabla 37.

Tabla 37: Costo de bombeo por profundidad

<b>Altura H</b> Bombeo mts	<b>HP</b> necesarios	<b>kW</b> resultantes	<b>Costo</b> US\$/año
100	444.00	333.00	291,708.00
150	667.00	500.25	438,219.00
200	889.00	666.75	584,073.00
250	1,111.00	833.25	729,927.00
300	1,333.00	999.75	875,781.00

350	1,556.00	1,167.00	1,022,292.00
400	1,778.00	1,333.50	1,168,146.00
450	2,000.00	1,500.00	1,314,000.00
500	2,222.00	1,666.50	1,459,854.00
550	2,444.00	1,833.00	1,605,708.00
600	2,667.00	2,000.25	1,752,219.00
650	2,889.00	2,166.75	1,898,073.00
<b>700</b>	<b>3,111.00</b>	2,333.25	2,043,927.00
750	3,333.00	2,499.75	2,189,781.00
800	3,556.00	2,667.00	2,336,292.00

### 3.7.2.7 Motores eléctricos

Con los HP de la bomba determinados, seleccione el siguiente motor Standard de más tamaño. (Refiérase a la tabla 38).

Tabla 38: Tabla estándar de motores eléctricos

0.33 HP	25 HP	250 HP	1,250 HP
0.5 HP	30 HP	300 HP	1,500 HP
1 HP	40 HP	350 HP	1,750 HP
1.5 HP	50 HP	400 HP	2,000 HP
2 HP	60 HP	450 HP	2,250 HP
3 HP	75 HP	500 HP	3,000 HP
5 HP	100 HP	600 HP	3,500 HP
7.5 HP	125 HP	700 HP	4,000 HP
10 HP	150 HP	800 HP	4,500 HP
15 HP	200 HP	900 HP	5,000 HP

Los motores eléctricos producidos fuera de Estados Unidos son del mismo tamaño pero expresados en kW (usar conversión). Un motor de 15 kW es lo mismo que un motor de 20 HP motor. Algunos motores de tamaño estándar que se fabrican no corresponden a los de tabla anterior (80 kW, 120 kW).

### 3.7.2.8 Pérdida de altura por fricción en tubería

La fórmula Standard (Hazen-Williams) se expresa como sigue:

$$h_f = 0.002083 * L * \left(\frac{100}{C}\right)^{1.85} * \left(\frac{Q^{1.85}}{d^{4.8655}}\right)$$

Dónde:

$h_f$  : Pérdida de altura debida a fricción en pies de líquido

$d$  : Diámetro interior de la tubería circular en pulgadas

$C$  : Factor de Fricción (Hazen-Williams)

$L$  : Largo del tubo incluyendo longitudes equivalentes por perdidas de accesorios en pies.

$Q$  : Flujo de líquido en USGPM.

El factor “C” para tubos de acero usados en desagüe o drenaje de minas es típicamente 120, entonces la ecuación puede simplificarse a la siguiente:

$$h_f = \frac{L * (Q)^{1.85}}{673 * d^{4.87}}$$

Esta ecuación es válida tanto para bombeo de agua limpia o sucia, sin embargo no es válida para bombeo de pulpas cuando el contenido de sólidos excede 40% en peso.

Tabla 39: Tabla Pérdidas de Altura (Head) en Pies por 100 Pies de tubería de acero Schedule 40 (Servicio de Mina)

Diam. Tubería	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"
<b>Flujo USGPM</b>	<b>Perdida de Altura (pies de agua)</b>								
20	1.1	0.16	0.04						
30	2.34	0.34	0.09						
40	3.98	0.58	0.15						
50	6.02	0.88	0.23						
60	8.43	1.23	0.33	0.04					
70	11.2	1.64	0.44	0.06					
80	14.4	2.1	0.56	0.08					
90	17.8	2.61	0.69	0.09					
100	21.7	3.17	0.84	0.11					
125	32.8	4.79	1.28	0.17	0.05				
150	45.9	6.71	1.79	0.24	0.06				
175	61.1	8.9	2.38	0.32	0.08				
200		78.2	11.4	3.04	0.41	0.11			
250		17.3	4.6	0.62	0.16	0.05			
300		24.2	6.44	0.88	0.23	0.08			
400		41.2	11	1.49	0.39	0.13	0.06		
500		62.2	16.6	2.25	0.59	0.2	0.08	0.05	
750			35.1	4.77	1.25	0.41	0.18	0.11	0.06
1000			59.7	8.12	2.13	0.7	0.3	0.19	0.1
1500				17.2	4.52	1.49	0.64	0.4	0.21
2000				29.3	7.69	2.54	1.08	0.68	0.36
3000				62	16.3	5.38	2.29	1.44	0.75
4000					27.7	9.15	3.9	2.46	1.28
5000					41.9	13.8	5.89	3.71	1.94
7500					88.7	29.3	12.5	7.86	4.1
φ Tubería	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"

### **3.7.3 Sistema de aire comprimido**

El aire comprimido que utilizaremos en la construcción del Proyecto Túnel de Integración, será utilizado principalmente en la actividad de sostenimiento (lanzamiento de shotcrete), para esto he considerado toda la teoría y sus ecuaciones para el cálculo de las necesidades de aire comprimido en el escenario más desfavorable del proyecto, así como el cálculo de los equipos que utilizaremos para tal efecto.

#### **3.7.3.1 Terminología**

Es necesario tener presente algunos conceptos de manera que se entiendan las ecuaciones y la aplicación para el cálculo de la necesidad de aire y el equipo que cumple con las condiciones presentadas.

##### **3.7.3.1.1 Aire libre**

Es el aire considerado bajo condiciones atmosféricas naturales del lugar. Como la altura, la presión y la temperatura varían en las diferentes localidades y en diferentes tiempos, consiguientemente habrá variaciones en el aire libre. Una confusión considerable ha existido con el término aire libre, habiéndolo interpretado a menudo como aire a condiciones del nivel del mar, con una presión absoluta de 14.7 libras/pulgada cuadrada y a la temperatura de 60°F. Esto no es correcto; el término aire libre se debe considerar bajo las

condiciones atmosféricas en el punto donde la compresora es instalada. Vale advertir que las compresoras grandes están diseñadas para trabajar bajo condiciones específicas, pues nada tiene que ver con el nivel del mar.

### 3.7.3.1.2 Temperatura absoluta

Es la temperatura contada a partir del cero absoluto o sea desde la temperatura teórica que corresponde a la carencia absoluta de calor. En la escala Fahrenheit, es la lectura del termómetro en grados Fahrenheit más 460°F. La temperatura absoluta en la escala centígrada es la lectura en el termómetro en grados centígrados más 273°C. Los grados absolutos para la primera escala son referidos como grados ranking y los de la segunda como grados kelvin. Veremos posteriormente que los cálculos del aire comprimido se basan en las temperaturas absolutas, porque las escalas corrientes son arbitrarias (se basan en la temperatura de congelación del agua 32°F o 0°C y de la ebullición del agua 212°F o 100°C).

1 Grado Kelvin = -272 Grados Celsius (centígrados)

1 Grado Ranking = -458.67 Grados Fahrenheit

**Grados F** = (°C x 9/5) + 32

### 3.7.3.1.3 Presión absoluta

Es la presión manométrica más la presión atmosférica del lugar. Ejemplo: si el manómetro de una compresora en la mina del madrigal da como lectura 70libras/pulgada cuadrada la presión absoluta será:

$$70 + 0.59 = 70.59 \frac{Lb}{pul^2}$$

Igualmente los cálculos de aire comprimido se basan en la presión absoluta, que es la presión sobre la presión cero absoluto que representa la carencia completa de presión, como nos imaginamos existe en el campo. Por ejemplo: La presión absoluta en una llanta de carro es la presión medida de la llanta y a eso se le suma la presión atmosférica. Si la llanta tiene 30 PSI y la presión atmosférica es 14.3 PSI, la presión absoluta de la llanta del carro es 44.3 PSI.

Tabla 40: Presión atmosférica a nivel del mar

1 Atmósfera (métrica) =	14.2233162044483 libra fuerza/pulgada cuadrada.
1 Atmósfera (métrica) =	393.710038049661 Pulgadas de agua (4 °C)
1 Atmósfera (métrica) =	98,066.1358019849 Newton/metro cuadrado
1 Atmósfera (métrica) =	1 Kilogramo fuerza/centímetro
1 Atmósfera (métrica) =	98.0661358019849 Kilo pascal (KPa)

#### 3.7.3.1.4 Presión manométrica

Es la presión registrada encima o bajo la presión atmosférica realmente en el lugar y momento de la medida. Una presión manométrica negativa se llama vacío en el manómetro es lo que se registra.

#### 3.7.3.1.5 Aire normal

Ha sido variadamente definido, nosotros lo referimos como el aire con 36% de humedad relativa a 68°F. Esto puede ser considerado como una condición promedio de la atmósfera, cerca del nivel del mar. La relación de calores específicos (O)<sub>2</sub> para aire normal es de 1.3947 y su densidad 0.075lb/pie<sup>3</sup> a 14.7 lb/pie<sup>2</sup> y 68°F. En Lima de 86% a 95% de humedad relativa.

#### 3.7.3.1.6 Capacidad real de una compresora

(De aire o gas) es la cantidad de aire o gas comprimido y expulsado. Normalmente se expresa en pies cúbicos por minuto, a la presión y temperatura. (Actual Cubic Feet per Minute) ACFM.- es la cantidad de aire comprimido y entregado. Si entra 1 atmósfera de Aire Libre al Compresor y salen 7 atmósferas de ACFM (100 PSI) la relación es 1/7. Los ACFM se expresan en pies cúbicos por minuto PCM (en Ingles CFM - cubic feet minute), o en m<sup>3</sup>/minuto.

1 Cubic feet/minute (CFM) = 0.0283168200014053 Cubic metros/minuto

#### 3.7.3.1.7 Eficiencia volumétrica

Es la relación del volumen de aire libre actualmente admitido, el volumen teórico resultado del desplazamiento del pistón.

#### 3.7.3.1.8 Eficiencia de compresión

Es la relación del caballaje teórico a los caballos de fuerza, actualmente indicamos que se requieren para comprimir una cantidad definida de aire o gas por ciento. La potencia teórica puede ser calculada de acuerdo a la base adiabática y la eficiencia de compresión correspondiente estará expresada en porcentaje.

#### 3.7.3.1.9 Eficiencia mecánica

Es la relación del caballaje indicado a los caballos de fuerza actualmente suministrado. Dentro de las unidades que manejo en las operaciones minera son: 1 HP en un motor eléctrico (Horsepower) = 550 ft-lbf/s = 745.70103 Watt. 1 HP = 0.75 kW.

En la construcción de túneles el costo de 1 kW puede estar entre \$0.040 y \$0.25 por kW-hora. La gran diferencia se debe al costo de la energía eléctrica. Una empresa minera puede comprar la corriente a una Empresa Generadora y deberá pagar el costo de la energía más el costo del Peaje por las Líneas de transmisión. Si está lejos le sale más caro. Puede ser total de 4.5 a 7 cts. \$ el kW-hora. Si la corriente eléctrica la genera la propia empresa con grupos electrógenos diesel, el costo básico de la energía es el petróleo diesel, mas su transporte, más el costo de operación de los grupos. Si está muy lejos de la costa, el kW/hora sale muy caro, para una operación pequeña en un lugar muy distante puede llegar a costar US\$0.25/kW-hora. En su casa en ciudades grandes como Lima, el Kw.-hora, con los impuestos les cuesta probablemente US\$ 0.13 kW-hora.

#### 3.7.3.2 Aire comprimido

El aire comprimido se usa para producir trabajo, especialmente en minas subterráneas. Las tuberías de aire llegan a los frentes y tajeos recorriendo galerías, piques y chimeneas. Puede haber decenas de kilómetros de tuberías de aire comprimido.

Al aplicar energía como aire comprimido el resultado es Trabajo. El trabajo es fuerza a través de una distancia. El trabajo disponible del aire comprimido es función del peso del aire. El peso del aire hace el trabajo. A continuación muestro algunos equipos que hacen uso de este recurso:

- Las perforadoras son máquinas a pistón impulsado por aire comprimido.
- Las palas mecánicas, rastrillos (scrapers), winches de mina, herramientas de mano y aguzadoras de barreno, tienen motores de aire comprimido.
- El shotcrete se lanza con aire comprimido.
- El gas hediondo (metil mercaptan) se envía por todas las tuberías de la mina. Al sentir el olor, se sabe que existe una alarma para abandonar la mina, y otras cosas más.

El aire de la compresora sale a más de 130 lbs/pulgada cuadrada (PSI). Lo deseable es que llegue al lugar de trabajo con 90 PSI, pero no menos de 85, sin embargo muchas veces llega a menos presión y eso baja la potencia de las máquinas y las hace lentas e ineficientes, si el aire tiene baja presión, cae la productividad.

#### 3.7.3.3 Tipos de compresora

Tenemos varios tipos en el mercado los cuales detallo a continuación:

- ❖ Reciprocantes o De Pistones (hasta 150 PSI uso normal).
- ❖ Rotativas, hasta 90 PSI
- ❖ De tornillo.- hasta 120 PSI. Son las más modernas, las más eficientes, las más confiables, y las más usadas actualmente.

- ❖ Centrifugas o Turbos.- (sopladores). Para aplicar relativamente grandes volúmenes a baja presión, máx. 7 PSI. Ejemplo para quemadores, para alimentar oxígeno a hornos reverberos, transporte de materiales por aire, para alimentar aire a motores de gasolina o diesel, etc.
- ❖ De alabes (tipo Roots) (sopladores) de mediano volumen, para presiones hasta 20 PSI, ejemplo: para soplar aire a hornos convertidores, para celdas de flotación o agitadores en las plantas de beneficio.

#### 3.7.3.4 Capacidad de planta

Los siguientes métodos se usan para determinar el requerimiento de una mina propuesta.

- Métodos Empíricos:
  - Con Formulas
  - Promediando data de instalaciones en minas comparables
- Método Analítico;
- Análisis y cálculo detallado

### 3.7.3.5 Cálculo de la necesidad de aire

Como ejemplo he tomado como base el cálculo de los requerimientos de aire comprimido para una mina subterránea propuesta por cada uno de los tres métodos indicados antes.

- ❖ La mina será una operación trackless con equipo móvil con potencia diesel.
- ❖ El ritmo de producción será 1,000 TM = 1,102.3 ton cortas.

#### 3.7.3.5.1 Ecuación de O'Hara

$$C = 140 * P^{0.5}$$

Dónde:

P : Tons cortas de mineral producido por día.

C : Nueva capacidad de planta en CFM

$$C = 140 * 1102.3^{0.5} = 4,468$$

### 3.7.3.5.2 Comparación con otras operaciones

Otra manera de estimar el aire requerido a 100 psi es comparar la demanda de otras minas en operación, de capacidad de producción parecida. Ver tabla 41.

Tabla 41: Comparativo con otras minas

Minas	Producción	Necesidad	Índice
Birchtree	2,300 tpd	7,000 CFM	3.04 CFM/ton
Bousquet No. 2	2,500 tpd	9,000 CFM	3.60 CFM/ton
David Bell	1,400 tpd	4,000 CFM	2.86 CFM/ton
Gaspé Copper	1,650 tpd	5,200 CFM	3.15 CFM/ton
Golden Giant	3,310 tpd	16,000 CFM	4.83 CFM/ton
Holloway	1,380 tpd	4,500 CFM	3.26 CFM/ton
Meston	1,200 tpd	4,400 CFM	3.67 CFM/ton
Nanisivik	2,425 tpd	8,400 CFM	3.46 CFM/ton
Niobec	2,500 tpd	5,900 CFM	2.36 CFM/ton
Ruttan	2,400 tpd	6,000 CFM	2.50 CFM/ton
Williams	6,615 tpd	20,000 CFM	3.02 CFM/ton
<b>Promedio</b>	<b>2,516 tpd</b>	<b>8,218 CFM</b>	<b>3.266 CFM/ton</b>

### 3.7.3.5.3 Calculo detallado

Otra forma de estimar las necesidades de aire comprimido es estimar según el equipo a usar (Caso del Proyecto Túnel de Integración). Se hace una Lista en hoja de cálculo de cada ítem de equipo, junto con su consumo de aire nominal que figura en el catálogo de la máquina. La figura del consumo se racionaliza

para tener en cuenta las horas que opera y su utilización. Una hoja de cálculo para este ejemplo y la solución resultante se encuentra en la tabla 42:

Tabla 42: Detalle del uso de equipo

Equipo	Cantidad	CFM	F.S	Total
	Maquinas			CFM
Jumbo	1	250	0.5	125.00
Jackleg	2	120	0.6	144.00
Mixer	1	350	0.4	140.00
Planta	1	250	0.8	200.00
Ventilador neumático	1	300	0.5	150.00
Sub total				759.00
Perdidas por tubería			25%	189.75
<b>Total</b>				<b>948.75</b>

CFM = CUBIC FEET MINUTE (pies cúbicos/minuto).

1 tonelada corta tiene 2,000 libras. 1 Tonelada Métrica tiene 1,1023

Toneladas Cortas.

FS = Factor de Servicio (simultaneidad de uso).

PSI = Pound Square Inch (libras por pulgada cuadrada).

De la tabla 42, observamos que la necesidad de aire comprimido para el proyecto Túnel de Integración es de 1000 CFM aproximadamente, con este valor hemos cruzado información con las compresoras comerciales del mercado y la más cercana es la de 1430 CFM – 350HP. El equipo será

colocado alrededor de la bocamina y sobre una losa horizontal, se abastecerá de energía de la subestación del proyecto y trabajara con tubería de 4"HDPE.

### 3.7.3.6 Pérdida de presión

Las pérdidas de presión están dadas por la Fricción en las Tuberías y las Fugas. La Perdida por Fricción es función del diámetro de la Tubería su Longitud y su Estado. Los cálculos prácticos se hacen usando la tabla 43.

Tabla 43: Perdidas por fricción en tuberías de aire -- en PSI, por cada 1000 pies de longitud de tubería.

Salida de aire Aire libre CFM	Equivalente CFM Comprimido	DIAMETRO DE TUBERIA DE FIERRO							
		3"	3,5"	4"	4,5"	5"	6"	8"	10"
1500	232	25,5	11,8	6	3,32	1,83	0,69		
2000	310	45,3	21	10,7	5,9	3,3	1,21	0,29	
2500	387	70,9	32,9	16,8	9,2	5,1	1,91	0,45	
3000	465		47,4	24,2	13,2	7,3	2,74	0,64	0,19
3500	542		64,5	32,8	17,8	10,1	3,7	0,85	0,26
4500	620		84,1	43	23,4	13	4,87	1,14	0,34
5000	697			54,8	29,8	16,4	6,15	1,44	0,43
6000	774			67,4	36,7	20,3	7,45	1,78	0,53
7000	929			96,5	53	29,2	11	2,57	0,77
8000	1082				72,1	39,8	14,8	3,5	1,06
9000	1240				94,2	52,1	19,5	4,37	1,36
10000	1395					65,8	24,7	5,78	1,74
11000	1550					81,3	30,5	7,15	2,14
12000	1710						36,8	8,61	2,6
13000	1860						43,8	10,3	3,08

### 3.7.3.6.1 Ecuación de la pérdida de presión

Las fugas en todas o cualquier parte de una red de tubería pueden calcularse usando el procedimiento siguiente:

- ❖ Calcular el volumen de aire en la línea o red que debe probarse.
- ❖ Convertir el volumen a aire libre (presión atmosférica).
- ❖ Llenar las líneas con aire a la presión normal de operación.
- ❖ Cerrar las líneas en cada extremo.
- ❖ Tomar tiempo de la caída de presión en la línea hasta que alcance cero.
- ❖ Aplicar la fórmula de Briggs.

$$Q = \frac{5 * V}{2 * t}$$

Dónde:

Q : Fugas en CFM

V : Volumen de aire libre en el sistema

T : Tiempo en minutos desde el cierre hasta que la presión del manómetro alcance cero.

### 3.8 VENTILACIÓN

El avance tecnológico y la globalización en nuestra sociedad, nos permite el uso de diferentes herramientas informáticas, las que abrevian una serie de cálculos y manejo de información compleja, sobre todo en la construcción de túneles cuyos ciclos de trabajos están en constante renovación. Laborar en la construcción de un túnel, no es tarea fácil, sobre todo cuando las condiciones ambientales son adversas y sus frentes son ciegos, y si estas condiciones no favorecen al trabajador, podemos obtener otros factores adversos como son los relacionados con la seguridad y salud ocupacional.

Cuando se implementa un sistema de ventilación en la construcción de un túnel se adquieren ventiladores los cuales son los responsables del provisionamiento de aire fresco. Podemos distinguir los siguientes sistemas: Cuando un Túnel es de frente ciego por general se trabaja con los caminos de doble entrada o se utiliza sistemas de ventilación cuyas mangas son metálicas y se colocan 2 ventiladores para satisfacer el equilibrio del ambiente de trabajo.

Implementar un sistema de ventilación no es difícil, hacerlo al inicio es de prioridad cero y está en función a las exigencias de seguridad que se recomiendan y al avance que se pretende entregar. El uso de fórmulas matemáticas en el cálculo de los diferentes parámetros de ventilación, complementado con la utilización de instrumentos de medición de los

diferentes contaminantes físicos y químicos presentes en cada mina subterránea, son elementos importantes que cada ingeniero de minas o técnico de ventilación que se dedica a realizar trabajos de ventilación en la construcción de túneles de gran longitud, debe conocer.

### **3.8.1 Objetivos**

- ❖ Determinar la necesidad de aire para condiciones desfavorables.
- ❖ Presentar el flujo a lo largo del túnel.
- ❖ Calcular la necesidad de los ventiladores.
- ❖ Mostrar el diseño 3D del sistema de ventilación.

### **3.8.2 Consideraciones generales**

En la mayoría de los casos la necesidad de aire limpio no está determinada por el escenario más desfavorable del proceso constructivo y solo se limita a cuantificar equipos y personas óptimas para su construcción, esto genera en el avance un impacto negativo en tiempo y dinero, evidenciándose un desfase notorio en lo programado vs ejecutado. Estas decisiones apresuradas sin sustento técnico generan grandes inversiones del momento e incremento del CAPEX final del proyecto así como su horizonte. En el presente informe se muestran los cálculos en base al escenario más ácido del proyecto para así poder tener holguras al momento de la construcción del Proyecto Túnel de

Integración el cual tendrá una longitud aproximada de 12.1 kilómetro y atravesará las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua.

### **3.8.3 Ingeniería del sistema de ventilación**

Los ventiladores cumplen una función básica, la cual es crear una diferencia de presión entre la entrada del ventilador y la salida del mismo. Para entender el análisis realizado del sistema de ventilación para el Proyecto Túnel de Integración es necesario plasmar algunos conceptos básicos usado en minería y relacionado a la teoría de fluidos.

#### **3.8.3.1 Volumen**

El volumen definido por la cantidad “Q” de gas (típicamente aire) en el sistema, se mide en pies cúbicos por minuto (CFM), metros cúbicos por segundo (M<sup>3</sup>/s) o litros por segundo (l/s). Para algunas aplicaciones tal como calderas y sistemas de combustión se usa flujo de masa y se expresa en libras por hora o kilogramos por segundo. El sistema de flujo de masa no es comúnmente usado en aplicaciones mineras, excepto cuando se realiza un balance de ventilación donde el volumen actual del aire en la mina varía debido a cambios de temperatura, presión o humedad (Mina Teniente, Sudáfrica como ejemplo); no hay ley física de conservación de volumen, pero si una ley de conservación de masa, de modo que el flujo de masa es el único método verdadero de confirmación ya que el flujo que sale de una

mina es el mismo flujo que entra.

En cualquier sistema que se mida, el volumen puede expresarse en unidades actuales o estándares. Un pie cúbico estándar de aire está definido como un pie cúbico a 70°F a cero pies sobre el nivel del mar y a una presión barométrica de 29.92 pulgadas de mercurio, pesando 0.075 lb (densidad del aire para el proyecto). En el sistema métrico el estándar es ligeramente diferente, la unidad típica es un metro cúbico a 0°C (32°F) a cero metros sobre el nivel del mar y a una presión barométrica de 101.325 kilo pascal pesando 1.294 kilogramos.

Cuando se usan unidades estándar, el volumen está definido como pies cúbicos estándar por minuto (SCFM) como opuesto a los pies cúbicos actuales (ACFM). Las unidades métricas se definen como, metros cúbicos normales por segundo (NM<sup>3</sup>/s) como opuesto a metros cúbicos actuales por segundo (M<sup>3</sup>/s).

### 3.8.3.2 Presión

La presión define la energía contenida en el gas o necesitada por un sistema para vencer la resistencia de flujo. La presión es típicamente medida en unidades de agua (water gauge “W.G.), pulgadas de mercurio (“Hg), libras por pulgada cuadrada (PSI), milímetros de agua (mm W.G.), Pascales o Kilos Pascales (Pa o KPa). Hay tres tipos diferentes de presión para considerar en

un sistema de ventilación:

- ❖ Presión Estática, que es la presión ejercida independiente de cualquier movimiento.
- ❖ Presión de Velocidad, que es la presión resultante del movimiento del gas.
- ❖ Presión Total, que es la suma de las presiones estáticas y de velocidad.

Como una ayuda para visualizar los diferentes tipos de presión considere la presión estática como la presión en un balón o tanque, la presión de velocidad como la fuerza que se siente cuando se mantiene la mano fuera de la ventana de un automóvil en movimiento, y la presión total como la fuerza en una manguera por donde circula agua, donde hay ambas, presión estática del sistema de agua y presión de velocidad de la energía cinética del agua en movimiento. Algunos conceptos sobre la presión que hemos encontrado útiles son:

- Asumiendo un sistema sin fricción, la presión total siempre permanece igual. Si se aumenta la velocidad, la presión de velocidad aumentará y la presión estática disminuirá; a la inversa, si disminuye la velocidad, aumentará la presión estática.
- Puede haber solamente una presión de algún tipo dado en algún punto dado en algún sistema; esto parece muy simple, pero si usted está midiendo presión en un sistema y encuentra dos presiones, hay un error

en sus mediciones.

- La presión no puede existir en forma independiente, es necesario que haya resistencia en un sistema.

### 3.8.3.3 Potencia – Trabajo

La potencia/trabajo es normalmente medida en caballos de fuerza (HP) o Kilowatts (KW). En esta presentación se usará la medida en sistema Inglés; se adjunta una tabla de conversiones para alternar unidades.

### 3.8.3.4 Efectos del entorno

Los ventiladores son equipos de volumen constante, cuando son conectados a un sistema y este no varía, los ventiladores siempre producirán el mismo flujo volumétrico. Sin embargo los ventiladores no son equipos de presión constante o de masa constante, la presión que estas generan, la masa de gas manejada y la potencia requerida variará directamente con la densidad del gas; a una velocidad y volumen dados, un gas de alta densidad generará una alta presión y alta potencia; mientras un gas de baja densidad generará una menor presión y potencia. Como los datos y curvas del ventilador son generalmente producidos para condiciones estándar es importante reconocer los factores que pueden afectar la presión, generando capacidades de un ventilador. Los principales factores del entorno que afectarán la capacidad del ventilador en la construcción del Túnel de Integración son:

#### 3.8.3.5 Altitud

Como la altitud aumenta el tamaño de la columna de aire sobre un área, la presión barométrica disminuye en ese punto; la reducción de presión reduce la densidad de aire y por lo tanto la capacidad de presión de un ventilador. En elevaciones de hasta 2,000 pies sobre el nivel del mar el efecto es pequeño y es típicamente ignorado en la mayoría de aplicaciones mineras; pero a elevaciones de 10,000 pies la densidad del aire es menor que la densidad al nivel del mar en un 70% y un ventilador operando en ese punto generaría solamente el 68.8% de la presión que se mostraría en una curva de condiciones estándar; a la inversa, a bajas elevaciones tal como en el fondo de una mina profunda, un ventilador generará más presión que la mostrada en una curva estándar. La presión barométrica varía en nominalmente 1 " Hg por 1000 pies de elevación; así la densidad del aire puede calcularse aproximadamente reduciendo la presión barométrica del sitio en 1" por cada 1000 ft de elevación, dividiendo la presión resultante por 29.92 y multiplicando la densidad estándar de 0.075 Ibs/pies<sup>3</sup> por la razón de presiones barométricas. Se incluye en el apéndice, una tabla donde se muestra la densidad del aire en varias elevaciones.

#### 3.8.3.6 Temperatura

Cuando la temperatura aumenta, los gases se expanden, requiriendo más espacio para una cantidad de masa dada y decrece en densidad; cuando la

temperatura disminuye, los gases se comprimen, ocupando menos espacio y aumentan en densidad. Las variaciones extremas en temperatura no son normalmente de mayor importancia en ventilación de minas con la excepción de los tamaños de motores de los ventiladores pueden requerir aire fresco para operar en condiciones similares al del libre. El efecto de la temperatura sobre la densidad del aire puede ser fácilmente calculado usando una razón de temperaturas absolutas; ya que el cero absoluto es  $-460^{\circ}\text{F}$ ; la variación de la densidad de aire estándar de  $0.075 \text{ lbs/pie}^3$  a  $70^{\circ}$  para  $250^{\circ}\text{F}$  sería:

$$\frac{(460 + 70)}{(460 + 250)} * 0.075 = 0.056 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

Una relación útil para recordar es que el aire a  $600^{\circ}\text{F}$  pesa tanto como la mitad de aire a una temperatura estándar de  $70^{\circ}$  y que la relación es lineal.

### 3.8.3.7 Grado de saturación y humedad

La presencia de vapor de agua en el aire no es generalmente significativa desde la perspectiva de desempeño de un ventilador en la mayoría de aplicaciones de ventilación de mina; sin embargo puede volverse importante a temperaturas más altas, a  $1500 \text{ F}$  el aire que está completamente saturado con vapor de agua pesará  $0.0493 \text{ lbs/pie}^3$  mientras el aire seco pesará  $0.0652 \text{ lbs/pie}^3$ , a  $70^{\circ}\text{F}$ . El aire completamente saturado pesará  $0.073 \text{ lbs/pie}^3$  como en oposición a  $0.075$  para el aire seco. Para aplicaciones de alta

temperatura/alta humedad debe consultarse una tabla psicométrica. El agua corriente o en gotas puede afectar a un ventilador en dos formas, en términos de su vida mecánica ya que el agua puede ser muy erosiva y/o corrosiva y en su consumo de energía ya que la presencia de grandes cantidades de agua aumentarán la densidad y por lo tanto el flujo de masa y energía requerida. La humedad puede ser una significativa consideración de comodidad en minas calientes y profundas y la falta de control de agua y evaporación puede afectar los volúmenes de ventilación necesarios para mantener un adecuado ambiente para el trabajo productivo.

#### 3.8.3.8 Presión positiva y negativa

La mayoría de curvas y datos del ventilador asumen que el ventilador está recogiendo aire estándar de la atmósfera y aumentan la presión; si el ventilador esta sobre una aplicación de expulsión, el aire está en presión negativa y su densidad decrecerá desde estándar por esa presión. A presiones típicas de ventilación de mina de 10" H<sub>2</sub>O o menor, la variación es pequeña y es generalmente ignorada, para verificar el efecto, puede usarse una razón de presiones barométricas. Una pulgada de mercurio, es igual 13.619 pulgadas de agua, así el efecto de una presión -10" H<sub>2</sub>O sería:

$$\left[ \frac{29.92 - \frac{10}{13.619}}{29.92} \right] * 0.075 = 0.0732 \frac{\text{lbs}}{\text{pies}^3}$$

Todos los factores antes mencionados deben considerarse cuando se ha planeado un proyecto de ventilación; puede decidirse que algunos de estos factores no son significativos, pero es mejor tomar esa decisión desde todo punto de vista.

### **3.8.4 Leyes del sistema de ventilación**

Los ventiladores operan de acuerdo con un grupo de funciones similares que son llamados las "Leyes del Ventilador". Estas leyes definen las relaciones entre las variables de desempeño en la operación del ventilador. Las leyes del ventilador más comúnmente usadas son aquellas que se relacionan con flujo, presión y potencia.

#### **3.8.4.1 Primera ley – flujo**

El flujo volumétrico varía directamente con la velocidad del ventilador, así si la velocidad del ventilador aumenta en 50%, el flujo también aumentará en 50%.

#### **3.8.4.2 Segunda ley – presión**

La presión varía como el cuadrado de la velocidad del ventilador, así la velocidad del ventilador incrementa en 50% la presión aumentará en  $1.5^2$  ó 2.25 veces.

#### 3.8.4.3 Tercera ley – potencia

La potencia varía como al cubo de la velocidad del ventilador. Así, si la velocidad del ventilador incrementa en 50%, la potencia aumentará en  $(1.5)^3$  o 3.375 veces.

#### 3.8.4.4 Cuarta ley – densidad

La presión del ventilador y la potencia variará directamente con la densidad del gas.

La resistencia de un sistema al flujo también varía por una función cuadrática del flujo de volumen, así que si usted quiere aumentar el flujo a través de una parte de una mina que esta corrientemente siendo a 100,000 ACFM a una caída de presión de 10" W.G., a 150,000 ACFM la resistencia aumentará a 22.50" W.G.; esta relación' de ley al cuadrado entre volumen y presión puede usarse para crear un sistema de línea o curva que definirá la presión necesaria para operar a algún punto dado si se conoce sólo algún punto de operación. En conjunción con una curva del ventilador también puede usarse para determinar el flujo que resultaría cuando uno o dos ventiladores montados en paralelo no operan. Hay leyes de ventilador que cubren las relaciones en diámetros y sonido de ventiladores, pero estos son de mayor interés para diseñadores de ventiladores e ingenieros, que para usuarios de ventiladores.

### 3.8.5 Ecuaciones básicas

En adición a las leyes de ventiladores y ecuaciones de corrección de presiones anotadas anteriormente hay varias ecuaciones que son muy útiles, las cuales son utilizadas en la construcción de Túneles y operaciones mineras.

#### 3.8.5.1 Ecuación de Atkinson

La ecuación de Atkinson provee un método de calcular la presión necesaria para vencer la resistencia de un sistema dado. La ecuación es:

$$H_f = \frac{K * P * L * Q^2}{5.2 * A^3}$$

Donde:

- $H_f$  : Cabeza de fricción en pulgadas W.G.
- $K$  : Coeficiente de pérdida (vea tabla de coeficientes en el apéndice)
- $P$  : Perímetro del ducto en pies
- $L$  : Longitud del ducto en pies
- $Q$  : Cantidad o volumen de aire en ACFM.
- $A$  : Área del ducto en pies cuadrados
- 5.2 : Constante de conversión

Nota: Cuando se use la ecuación Atkinson para el cálculo de ducto

respiradero debe usarse la longitud teórica más bien que la longitud verdadera. Generalmente debe usarse un factor de seguridad cuando se calcule las pérdidas de cualquier sistema para cubrir, fuga, encorvadura, obstrucciones, roca caída y futuras necesidades de ventilación.

### 3.8.5.2 Ecuación de la presión de la velocidad

La presión de velocidad puede calcularse de dos formas usando una constante para el aire normalizado (estándar) o usando la densidad del gas verdadero en la ecuación.

$$P_V = \left( \frac{\text{Velocidad}}{4005} \right)^2 \quad \dots \text{ para aire normalizado.}$$

$$P_V = \text{Densidad} * \left( \frac{\text{Velocidad}}{1097} \right)^2 \quad \dots \text{ para aire no normalizado.}$$

Nota: Como se mencionó en la sección ley del ventilador, la presión varía con el cuadrado del cambio de volumen. Así el flujo a través de un ducto o sistema varía, la resultante presión de velocidad puede calcularse usando el método Ley de ventilador más bien que el cálculo de la presión de velocidad.

### 3.8.5.3 Ecuación de los caballos de fuerza del aire

Es a menudo deseable obtener un estimado aproximado de la potencia requerida para manejar un sistema dado. Un método para hacer esto es calcular el caballo de fuerza del aire, el cual es la potencia requerida exclusivamente de la ineficiencia del ventilador.

$$\mathbf{AHP} = \frac{\mathbf{(Q * P_t)}}{\mathbf{6,362}}$$

Donde:

AHP : Caballo de fuerza del aire

Q : Volumen de flujo en ACFM

Pt : Presión total

6,362 : Constante

### 3.8.6 Lecturas de las curvas de un ventilador

Las curvas del ventilador dan una representación gráfica del desempeño de un ventilador y son herramientas valiosas para seleccionar y operar un ventilador. Las curvas típicas usan las abscisas (eje x) para el volumen y de ordenadas (eje y), una para la presión y una para caballo de fuerza. Las curvas de ventilador centrífugo generalmente están expresadas como presión estática y muestran el rango completo de operación del ventilador desde cerrado (flujo cero) a flujo libre (presión cero). Las curvas axiales del ventilador están

generalmente expresadas como presión total y muestra solamente el rango utilizable de desempeño, desde presión de pico a presión de velocidad en velocidad de cono de descarga estándar. Aunque los ventiladores centrífugos y axiales, ambos operan de acuerdo con las leyes del ventilador, discutidos previamente, sus curvas son bastante diferentes como es la respuesta del trazo de potencia a la presión variante.

Los ventiladores axiales típicamente tienen una curva de potencia con forma ligera de campana con la más alta potencia en aproximadamente el 85% de la presión de pico, la potencia ligeramente más baja a la presión de pico y potencia más baja en flujo libre. Un componente importante del desempeño de un ventilador axial es la parte de la curva del ventilador a la izquierda de (a volúmenes más bajos que) la presión de pico. En algunos ángulos de paleta en la mayoría de ventiladores axiales, la presión que genera capacidad cae abruptamente a la izquierda de la presión de pico y luego sube hacia cortado. Esta área en la curva es llamada zona de parada y el ventilador no debe operarse en esta parte de la curva. La característica de parada de un ventilador puede ser importante cuando dos o más ventiladores están funcionando en paralelo y puede ser necesario iniciar un ventilador cuando los otros están funcionando. Si el punto de operación final es muy alto (+/- 85%) en la curva del ventilador, el segundo ventilador puede ser atrapado debajo del canal de parada y no podrá generar suficiente presión para vencer la resistencia del sistema y operar al mismo rendimiento como el primer ventilador(es). Unas cuantas notas sobre el uso e interpretación de las curvas del ventilador:

- ❖ Asegúrese de saber si es una curva de presión estática o presión total.
- ❖ Asegúrese si hay algunas pérdidas de accesorios incluidos en la curva de desempeño.
- ❖ Asegúrese que la curva refleja exactamente el ambiente verdadero de funcionamiento o que se han realizado correcciones al punto de rendimiento del ventilador para que iguale al rendimiento de los parámetros de la curva.
- ❖ Reconozca que la curva del ventilador está basada en un grupo definido de condiciones y que la instalación actual puede tener condiciones que afecten la capacidad del ventilador; operar a los niveles de la curva. (Refiérase a la publicación AMCA 201-90 Ventiladores y Sistemas para discusión sobre factores de eficiencia del sistema).
- ❖ Para obtener valores para la operación del ventilador en sistema paralelo o serie pueden utilizarse curvas estándar si no se dispone de curvas propias.
- ❖ Para aplicaciones en serie duplique los valores de presión. El volumen permanecerá constante, el BHP será correcto sobre una base por motor.
- ❖ Para aplicaciones en paralelo, duplique los valores de volumen, cualquiera de los dos, multiplicando los valores mostrados o usando un compás o divisores para generar la curva múltiple del ventilador.

### 3.8.7 Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño de un sistema de ventilación es similar al de una mina metálica o de carbón con la diferencia que en la construcción de un túnel, el frente es ciego y la necesidad de ventiladores es finita así como el circuito del flujo del aire limpio y viciado. A continuación muestro un enfoque para la determinación del sistema.

- ❖ Seleccionar el sistema principal y secundario.
- ❖ Determinar los requerimientos de aire limpio.
- ❖ Definir la ubicación de los ventiladores principales y secundarios.
- ❖ Determinar la resistencia del aire durante su recorrido y generar un modelo 3D del sistema de ventilación.
- ❖ Calcular los parámetros del sistema de ventilación y determinar las características del ventilador.
- ❖ Ajustar las resistencias, los ventiladores, tapones, donde se requiera y correr nuevamente el modelo 3D.
- ❖ Considerar escenarios alternativos y planes de contingencia y correr nuevamente el modelo.
- ❖ Revisar los planos al detalle, para realizar el mapa de riesgos que pudieran afectar a la seguridad del trabajador.

### 3.8.8 Sistema principal y secundario del túnel

El sistema de ventilación del proyecto túnel de integración de las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua ha sido dividido en 2 etapas y son función de los avances que se pretende establecer, correlacionado al escenario más desfavorables el cual es construir en la primera etapa 4,212 metros y en la segunda 5, 009 metros, esta última se complica porque entre las minas San Cristóbal y Andaychagua no existe laboreo antiguo y por ende es un frente ciego en su totalidad. El diseño se encuentra en el plano TES-PTI-2015-IB-VEN-001. El siguiente cuadro muestra la longitud de las etapas y si estas son labores ciegas, de manera que cada etapa tenga un análisis diferente de construcción.

Tabla 44: Etapas del proceso constructivo

<b>Etapas</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Frente</b>	<b>Observación</b>
Etapa I	+0	+3,057	1	Frente ciego
Etapa I	+5,129	+3,057	2	Intersección con labores mineras
Etapa II	+5,129	+5,961	1	Intersección con labores mineras
Etapa II	+7,973	+10,070	1	Frente ciego
Etapa II	12,100	+10,070	2	Frente ciego

El anexo 12 y 13 muestra el balance de aire para el proyecto en mención, la necesidad de aire, el diseño del sistema de ventilación, la curva de los ventiladores, la resistencia, la pérdida de la energía y el tiempo de limpieza del aire viciado.

### 3.9 EVALUACIÓN ECONOMICA

La evaluación económica del Proyecto Túnel de Integración, centra su proceso en la disminución del OPEX al construir este activo, el cual es una labor estratégica que beneficiará directamente a las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua.

El incremento de la producción de las minas antes mencionadas será un beneficio directo así como la reducción del costo de transporte de mineral, a la vez también existen costos indirecto que eliminarán o reducirán como por ejemplo: El menor impacto al medio ambiente, disminución de problemas con las comunidades, facilidad para transportar el relleno hidráulico a las minas, abastecimiento de energía mediante un cable de 10KV, ventilación, menor tiempo del traslado de personal y la supervisión, dichas actividades se manifestarán en el incremento de la productividad, disminución del costo e incremento de la producción.

La conversión de un proyecto en ejecutable usualmente requiere que su presupuesto sea aprobado sobre la base de un expediente Técnico-Económico-Ambiental. En algunos casos la conversión funciona a la inversa; una cantidad de dinero es asignada para el trabajo en un proyecto. Existe una desventaja en esta concepción debido a la tendencia a gastar la suma presupuestada aún si el proyecto no justifique los gastos, o en caso contrario, se asigna cantidades de dinero que no son suficientes. El criterio para

determinar cuándo un proyecto se convierte en tal es variable y generalmente esto ocurre cuando existe suficiente información para establecer la viabilidad económica.

Con la construcción del Proyecto Túnel de Integración, incrementaremos el margen operativo de la unidad Yauli, al reducir el OPEX, por el efecto directo del transporte de mineral y desmonte, transporte de relaves, relleno hidráulico, servicios mina, ventilación, menor impacto al medio ambiente y merma de problemas con las comunidades. Todos estos costos no han sido considerados para la evaluación económica, a cambio si el transporte de mineral; mediante el VAN y la TIR demostrare lo viable que es tener este activo estratégico construido en el menor tiempo.

Mediante el uso de las matemáticas financieras y el análisis de sensibilidad del proyecto, se ha determinado variaciones al Túnel de Integración que nos permitan obtener un margen operativo en el menor tiempo con un menor CAPEX, esto sin perder la esencia del proyecto, el cual es unificar las minas Carahuacra - San Cristóbal – Andaychagua mediante la construcción de este activo, incrementar la producción y reducir el OPEX.

Por ultimo en la ejecución del proyecto se ha considerado su gestión bajo las normas internacionales del PMI, el cual es una guía para controlar el horizonte, los costos y el alcance del mismo a fin de cumplir con lo planificado.

### 3.9.1 Objetivos

- ❖ Mostrar los conceptos fundamentales
- ❖ Presentar las variables del proyecto
- ❖ Aplicación de las matemáticas financieras
- ❖ Describir el flujo de caja del proyecto
- ❖ Calcular las medidas de rentabilidad VAN – TIR
- ❖ Visualizar las variaciones del proyecto (tread off).

### 3.9.2 Conceptos básicos

Para entender la formulación y evaluación de un proyecto es necesario entender ciertos conceptos básicos a fin de uniformizar los resultados y su entendimiento.

#### 3.9.2.1 Formulación

Viene a ser la presentación de un proyecto viable el cual se concibe como la unidad mínima operacional que vincula recursos, actividades y componentes durante un período determinado y con una ubicación definida. Digamos ante todo que, en el uso corriente de la palabra proyecto se utiliza para designar el propósito de hacer algo. Al pensar en la formulación de un proyecto surgen varios interrogantes que de alguna manera ayudan a construir el marco referencial de dicho proyecto. El cuadro 55 explica el significado de formular

un proyecto y genera las preguntas necesarias para realizarla.

Tabla 45: Qué significa formular un proyecto

<b>Preguntas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tipo</b>
Qué	Se quiere hacer	Naturaleza del proyecto
Por qué	Se quiere hacer	Origen y fundamentación
Para qué	Se quiere hacer	Objetivos y propósitos
Cuánto	Se quiere hacer	Metas
Dónde	Se quiere hacer	Localización física
Cómo	se va hacer	Actividades y tareas. Metodología
Cuándo	se va hacer	Cronograma
A quiénes	Va dirigido	Beneficiarios
Quiénes	Lo van hacer	Recursos humanos
Con qué	se va hacer	Recursos materiales

### 3.9.2.2 Evaluación

La evaluación busca cuantificar el impacto efectivo, positivo o negativo de un proyecto, sirve para verificar la coincidencia de las labores ejecutadas con lo programado, su objeto consiste en “explicar” al identificar los aspectos del proyecto que fallaron o no, si estuvieron a la altura de las expectativas. Analiza las causas que crearon ésta situación, también indaga sobre los aspectos exitosos, con el fin de poder reproducirlos en proyectos futuros, ya sean de reposición o de complementos, en resumen evaluar un proyecto es emitir un juicio sobre su bondad de un bajo ciertos criterios.

Dichas decisiones de inversión, se toman en el presente para realizar operaciones futuras, los parámetros (costos y precios) del cálculo del flujo de caja se tienen que estimar en un grado de precisión que reduzcan los riesgos asociados a la inversión. Como es difícil estimar niveles de inflación, escalamiento, climatológicos, problemas sociales y políticos, la mayoría de proyectos de evaluación usan dólares constantes (dólares en el momento de la inversión) para elaborar su flujo de caja. Para el proyecto Túnel de Integración la estimación de la inversión y de los costos de construcción tiene un mayor grado de precisión que sus beneficios, esto es debido al comportamiento ambiental y económico complejo y variable en medición.

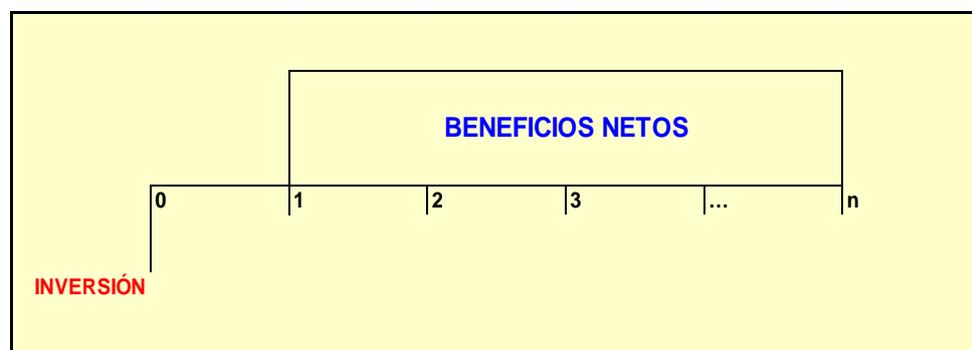


Figura 25: Esquema general de la evaluación de proyectos

**¿El proyecto es rentable si los beneficios netos futuros actualizados > Inversión!**

En conclusión, formular y evaluar el Proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua tiene como objetivo principal:

- ❖ Incrementar el valor de las acciones de sus inversionistas.
- ❖ El proyecto es rentable e incrementará el valor de la empresa como activo.
- ❖ Debido a que los recursos financieros de las empresas son limitados para ejecutar todos proyectos, es necesario rankearlo con otros proyectos para ver su importancia en el largo plazo, como ejemplo: Pique central, Planta Shocretera, Pique Letts, entre otros.
- ❖ Evaluar un proyecto implica identificar creativamente beneficios y costos de una idea o alternativa, con el objeto de crear valor.
- ❖ La preparación y evaluación de proyectos mineros es de carácter multidisciplinario, debido a que intervienen varias disciplinas: planeamiento estratégico, geología, ingeniería, aspectos ambientales y sociales.
- ❖ El ingrediente esencial en la evaluación de proyectos es la creatividad, por tanto, los programas de evaluación de proyectos sólo complementan el trabajo del evaluador, por ejemplo, facilitando la elaboración de flujos de caja, los cálculos de rentabilidad o las simulaciones de diversos escenarios.

### 3.9.3 Variables del proyecto

Dentro de la gama de variables de cualquier proyecto de inversión, para el proyecto túnel de integración tenemos las siguientes:

- ❖ Variables de inversión o de capital el cual está caracterizado principalmente por la inversión (CAPEX) del proyecto a desarrollar.
- ❖ Variables operativas como: Ingresos del proyecto, costos y gastos, vida útil.
- ❖ Variables financieras, el cual viene representada por la tasa de descuento que es la suma de la tasa del dinero prestado o costo de oportunidad, el riesgo país y la inflación.

Para el Proyecto Túnel de Integración he considerado las variables antes mencionadas, de manera que pueda establecer su evaluación mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{VAN} = -\mathbf{I}_0 + \sum_{i=0}^n \frac{\mathbf{B}_i - \mathbf{C}_i}{(\mathbf{1} + \mathbf{i})^n}$$

Dónde:

$\mathbf{I}_0$  : Inversión (CAPEX) del Proyecto Túnel de Integración.

$\mathbf{B}$  : Beneficio.

$\mathbf{C}$  : Costo del proyecto.

$\mathbf{n}$  : Vida útil del proyecto.

$\mathbf{i}$  : Tasa de descuento del proyecto.

### 3.9.3.1 Inversiones

Dentro de las inversiones del Proyecto Túnel de Integración, tenemos las inversiones iniciales, durante el proceso constructivo (ya sea por el reemplazo, las ampliaciones, entre otros) y al cierre del mismo. Estas inversiones se manifiestan en la compra de activos fijos (Equipos e infraestructura), activos intangibles, relacionados a los gastos de la organización y las inversiones del capital de trabajo.

### 3.9.3.2 Ingresos

Como ingresos tenemos la reducción de los costos por transporte del mineral principalmente, hacia las Planta Victoria y Andaychagua por el Túnel de Integración. Una vez concluida la construcción de la primera etapa, todo el mineral de Carahuacra y San Cristóbal, será trasladado por dicho activo. Así mismo quedarán activos (equipos e infraestructura) para la operación. Con la construcción del Túnel de Integración tendremos una reducción de los costos.

### 3.9.3.3 Costos del proyecto

Son los costos y gastos diferenciales y futuros vinculados a la ejecución del proyecto (egresos relevantes), que signifiquen salida real de dinero, estos costos son:

- ❖ Costo de construcción.
- ❖ Gastos operativos (administrativos).
- ❖ Gastos financieros.
- ❖ Amortización de deudas.

Para el presente análisis no he considerado la depreciación debido a que el Proyecto Túnel de Integración será utilizado a lo largo de toda la vida de las minas.

#### 3.9.3.4 Horizonte del proyecto

El horizonte de un proyecto es el tiempo de vida de la construcción del proyecto, debe de considerarse además el cierre de la misma. Esta variable es importante a fin de determinar el flujo de caja.

Cabe recalcar que la vida operativa del proyecto, depende del tiempo de las etapas a desarrollar principalmente. El Proyecto Túnel de Integración puede culminar cuando no se tenga capital para continuar, esto puede ocurrir ante la bajada de precios de los minerales que se explota, depende de la coyuntura internacional.

### 3.9.3.5 Tasa de descuento

Es el costo de los fondos requeridos por el proyecto. También, es la rentabilidad mínima exigida para el proyecto. También es considerado como el costo que se paga por el dinero utilizado para desarrollar el proyecto. Dentro de los componentes de la tasa de descuento he considerado lo siguiente:

- ❖ Tasa de interés libre de riesgo ( $R_f$ )
- ❖ Riesgo de la empresa ( $R_p$ )
- ❖ Riesgo país ( $R_c$ )
- ❖

De lo anteriormente escrito se obtiene la tasa de descuento, la cual no contiene la inflación:

$$i = R_f + R_p + R_c$$

### 3.9.4 Alcance del estudio del proyecto

En términos generales se realizan cinco análisis particulares para evaluar el Proyecto Túnel de Integración. De todos estos el más importante es la viabilidad técnica y financiera, los demás deben ser considerados como referenciales para el presente estudio.

#### 3.9.4.1 Viabilidad comercial o del mercado

Indicará si el mercado es o no sensible al bien o servicio producido por el proyecto y la aceptabilidad que tendría por su consumo o uso. Estudia los fenómenos de oferta y demanda, las características del mercado, definido este como un espacio social, virtual, flexible y dinámico, conformado por la organización como tal, por sus usuarios reales y potenciales y por los competidores teniendo en cuenta el ciclo de vida de los productos o servicios.

#### 3.9.4.2 Viabilidad técnica

Estudia las posibilidades materiales, físicas, químicas de producir el bien o servicio que espera generarse del proyecto. Involucra los costos directos e indirectos de fabricación del producto o de prestación del servicio.

#### 3.9.4.3 Viabilidad de la plataforma jurídica

Contempla dos ámbitos el externo, que nos muestran las regulaciones jurídicas existentes que hacen o no viable la puesta en marcha del proyecto y las de carácter interno, que nos remiten a revisar los procedimientos, el análisis de información para identificar el tipo de servicios que la empresa

está obligada a prestar, de acuerdo con la filosofía Institucional (misión, visión y valores corporativos).

#### 3.9.4.4 Viabilidad de la gestión

Se refiere a la capacidad administrativa para emprenderlo. Define las condiciones mínimas que se hacen necesarias para emprender el proyecto tanto en lo funcional, como en lo estructural. Por lo tanto define el organigrama, manuales de funciones y procedimientos, estrategias operativas y cronograma del proyecto.

#### 3.9.4.5 Viabilidad financiera

Estima la rentabilidad de la inversión. Para ello se determinan los recursos financieros (fijos y corrientes), los ingresos estimados, los costos operacionales, las fuentes de Financiamiento, así como un cronograma de la inversión.

### **3.9.5 Indicadores de gestión de un proyecto**

Los indicadores de un proyecto son descripciones operativas (cantidad, calidad, grupo destinatario, tiempo y localización, etc.) de los objetivos y resultados de la intervención, que cubran lo esencial y que puedan medirse de

manera fiable mediante costos razonables. Los indicadores permiten evaluar el desempeño del proyecto frente a sus metas, objetivos y responsabilidades con grupos de referencia. Para permitir un seguimiento eficaz, los indicadores objetivamente verificables deben a menudo detallarse más o hacerse más operativos durante la fase de ejecución. Cada proyecto establece sus indicadores de gestión en concordancia a los objetivos y metas, sin embargo se podría presentar una clasificación general de ellos.

#### 3.9.5.1 Índices de eficiencia

Evalúan la Participación en el mercado, el desarrollo de nuevos productos, la rotación de los inventarios, la deserción de clientes, etc.

#### 3.9.5.2 Índices de eficacia

Dan cuenta de la Razón de Rendimiento obtenida sobre los recursos Utilizados (pesos, horas, %, etc)

#### 3.9.5.3 Índices de efectividad

Determinan el cumplimiento y la responsabilidad del proyecto.

#### 3.9.5.4 Índices de impacto

Son los factores que determinan la competitividad del proyecto (satisfacción del cliente interno y externo).

#### 3.9.5.5 Índices de igualdad

Establecen la justicia, la imparcialidad, la igualdad.

#### 3.9.5.6 Índices de actividad

Determinan la relación entre el número de actividades planeadas y el número de actividades desarrolladas. Es necesario entonces, fijar indicadores de gestión para cada uno de los frentes del proyecto como lo son: Mercadeo, finanzas, producción, administración, recurso humano, informática, investigación y desarrollo.

El funcionamiento de cada uno de estos aspectos no hace por sí mismo el logro del proyecto. Su interacción, su coordinación, es la que garantiza el logro de los objetivos trazados. Decimos entonces, que la realización de un proyecto determinado, debe de dar cuenta a una problemática real; por lo tanto, el análisis de los problemas es fundamental para anticiparse a sus posibles soluciones.

### 3.9.6 Valor del dinero

En cualquier tipo de entidad, siempre se presenta el movimiento de dinero. Una persona física cobra o percibe dinero por algún concepto, llámese sueldo, pensión, comisión... Y entrega a alguna otra entidad parte de ese dinero para poder subsistir. Lo mismo sucede en los negocios por la venta de concentrados y se entrega dinero a los proveedores. Dado que la ingeniería económica tiene como objetivo analizar esos movimientos de dinero, llamados formalmente flujos de efectivo, necesita herramientas, tanto físicas como gráficas, para representar de manera clara y sencilla tales flujos efectivos.

Debido al fenómeno inflacionario presente en cualquier tipo de economía, sea de un país avanzado o de uno en vías de desarrollo, una unidad monetaria actual no tiene el mismo poder adquisitivo que tendrá dentro de un año. Es decir, no son equivalentes pues no se están comparando bajo las mismas condiciones.

Dado que lo único que hace diferente en poder adquisitivo a esa unidad monetaria es el tiempo, una base adecuada de comparación podría ser: medir el valor de ese dinero en un solo instante, ya sea el día de hoy, dentro de un año o en cualquier instante; pero que sea el mismo instante de tiempo.

### 3.9.6.1 Capitalización de intereses

Proceso mediante el cual los intereses se adicionan al principal (capital original), resultando un “nuevo principal” sobre el que se calcularán los nuevos intereses. El interés está asociado al periodo de capitalización el cual, el tiempo que debe transcurrir para que se capitalicen los intereses.

### 3.9.6.2 Interés simple

En una operación de interés simple, el capital que genera dicho interés permanece constante a lo largo del tiempo que dura la operación. La capitalización, que es la adición de dicho interés al capital original, se realiza al término de la operación.

$$I = P * n * i$$

Donde:

I : Interés

P : Capital

n : Períodos

i : Tasa de interés

### 3.9.6.3 Interés compuesto

El interés compuesto es aquél que se adiciona al capital inicial (se capitaliza), de forma tal que los intereses sucesivos se computan sobre el nuevo monto capitalizado. En el interés compuesto hay “Interés sobre intereses”.

$$\mathbf{M = P * (1+i)^n}$$

Donde:

M : Monto

P : Capital

n : Períodos

i : Tasa de interés

### 3.9.6.4 Tasa de interés nominal y efectiva

La diferencia entre el interés compuesto y simple, radica en que el primero incluye el interés sobre el interés ganado, mientras que el segundo no. En esencia la tasa de interés nominal y efectivo tiene el mismo principio. Estos conceptos se usan cuando el periodo de capitalización es menor a un año. Así, cuando una tasa de interés se expresa sobre un periodo de tiempo menor que un año, tal como 1% mensual, los términos tasa de interés nominal y efectivo deben considerarse.

Por lo tanto la tasa de interés efectiva, es la tasa de interés real calculada a partir de una tasa de interés nominal, y que dependen del periodo de capitalización de los intereses.

$$i = \left(1 + \frac{j}{m}\right)^n - 1$$

Dónde:

I : tasa efectiva

J : tasa nominal

m : periodos de capitalización de la tasa nominal

n : periodo de capitalización de la tasa efectiva

### 3.9.7 Valor presente – VPN ó VAN

El valor presente neto (VPN o VAN), es el más utilizado porque pone en dólares de hoy, tanto los ingresos futuros como los egresos futuros, lo cual facilita la decisiones desde un punto de vista financiero, de realizar o no un proyecto. Como regla practica al usar el VPN, debemos de considerar que los egresos se tomaran como signo negativa y que en la gráfica del tiempo se dibujaran hacia abajo, lo contrario ocurre con los ingresos, es por esta razón que el VPN podrá tomar valores positivos, negativos o cero. Para colocar todo el flujo de caja en dólares de hoy es necesario utilizar una tasa de interés que denominaremos la tasa del inversionista y es la tasa que gana

normalmente el inversionista en todos sus negocios. Al calcular el VPN a la tasa antes mencionada podrá ocurrir lo siguiente:

Tabla 46: Significado de los valores del VPN

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>
VPN > 0	Habrá una ganancia, por encima de la tasa que se utilice para evaluar el proyecto.
VPN = 0	Financieramente es indiferente realizar el proyecto.
VPN < 0	No es aconsejable realizar el proyecto, porque el inversionista ni siquiera alcanza la rentabilidad.

Cabe recalcar que mientras más alta sea la tasa con que se evaluó un proyecto, es más difícil que el proyecto pueda ser aceptado, por esta razón, un proyecto puede resultar favorable para un inversionista mientras que para otro no puede serlo.

#### 3.9.7.1 Utilización del VPN

El VPN puede utilizarse en un proyecto individual o en la decisión sobre alternativas de inversión, en el primer caso solo basta conocer el signo del VPN para tomar la decisión. Ahora puede ocurrir que se presenten varios proyectos, pero la ejecución de uno de ellos excluye la posibilidad de ejecución de cualquiera de los otros, en este caso se debe evaluar cada alternativa por separado, pero siempre usando el mismo horizonte de

planeación a fin de poder comparar. Existe otro caso particular en el cual se evalúan proyecto con diferente vida útil, para ello se toma un horizonte de planeación que es igual al mínimo común múltiplo de la vida útil de cada una de las alternativas.

Para el proyecto Túnel de Integración he realizado una evaluación para 15 años (hasta el 2030), es necesario mencionar que dicho proyecto tendrá una vida útil infinita o hasta que las minas ya no tengan reservas de mineral. También he elaborado una serie de ecuaciones que he utilizado para el cálculo del VAN del proyecto, estas ecuaciones son mostradas en los acápites siguientes.

### 3.9.7.2 Ecuaciones para el cálculo de VPN

Las formulas son derivadas de la ecuación del interés compuesto y a partir de ahí mediante las técnicas de inducción & deducción se establecen la ecuación para el cálculo del VPN o VAN.

$$F = P * (1 + i)^n$$

$$P = \frac{F}{(1+i)^n}$$

$$A = P * \left[ \frac{i*(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

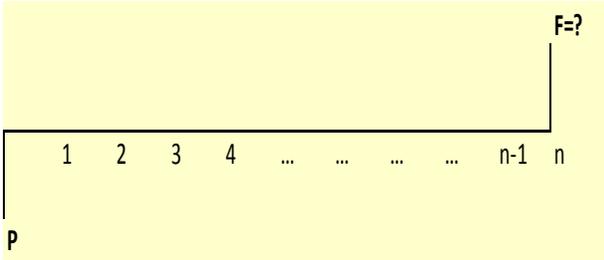
$$P = A * \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i*(1+i)^n} \right]$$

$$F = A * \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

$$A = \frac{F*i}{(1+i)^n - 1}$$

**01.- CALCULO DEL VALOR FUTURO DEL DINERO (F)**

Ejemplo: Una persona deposita sus ahorros de 3,500 US\$ a un banco durante 4 años y a un interes del 15% capitalizable anualmente. ¿Cuanto tendra acumulado al final del cuarto año?



Ahorros	F	-3,500.00
Periodos	n	4
Interes	i	15%
<b>Valor futuro</b>	<b>VF</b>	<b>6121.52</b>

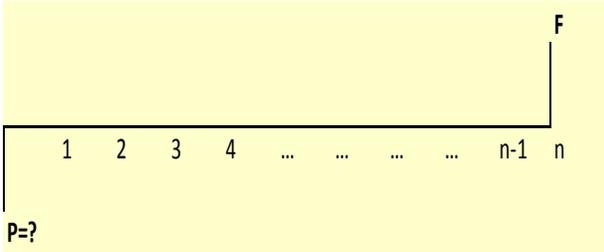
$$F = P * (1 + i)^n$$

**VF(tasa,nper,pago,va,0)**  
No se cuenta con el dato de pago

Figura 26: Cálculo del valor futuro (F)

**02.- CALCULO DEL VALOR ACTUAL DEL DINERO (P)**

Ejemplo: Una persona espera recibir una herencia dentro de 5 años por una total de US\$ 50,000. Si la tasa de interes es de 12% anual capitalizado cada año, ¿A cuanto equivale los 50,000 US\$ al día del hoy?



Valor futuro	F	-50,000.00
Periodos	n	5
Interes	i	12%
<b>Valor actual</b>	<b>VA</b>	<b>28371.34</b>

$$P = \frac{F}{(1 + i)^n}$$

Figura 27: Cálculo del valor actual (P)

**03.- SERIE UNIFORME DE PAGOS Y SU RELACIÓN CON EL PRESENTE (P)**

Ejemplo: Una persona compra una casa por 100,000US\$ y decide pagarla en 10 anualidades iguales, haciendo el primer pago un año después de adquirir la casa. Si la inmobiliaria cobra un interés del 10% capitalizado anualmente, ¿A cuanto asciende los pagos iguales anuales que deberían hacerse?

Valor actual	P	-100,000.00
Periodos	n	10
Interes	i	10%
<b>Anualidad</b>	<b>PAGO</b>	<b>16,274.54</b>

$$A = P * \left[ \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right]$$

Figura 28: Serie uniforme de pagos y su relación con el presente (P)

**04.- CALCULO DEL VALOR ACTUAL A PARTIR DE UNA SERIE DE ANUALIDADES**

Ejemplo: Una ama de casa compra a crédito una lavadora y acuerda pagarla en 12 pagos iguales mensuales de 95\$ comenzando dentro de un mes. Si el proveedor cobra un interés del 2% mensual en sus ventas a crédito, ¿Cual es el valor al contado de la lavadora?

<b>Valor actual neto</b>	<b>VNA</b>	<b>1004.66</b>
Periodos	n	12
Interes	i	2%
Anualidad	Pago	95.00    95.00    95.00    95.00    95.00    95.00
		95.00    95.00    95.00    95.00    95.00    95.00

$$P = A * \left[ \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} \right]$$

Figura 29: Cálculo del valor actual a partir de una serie de anualidades (A)

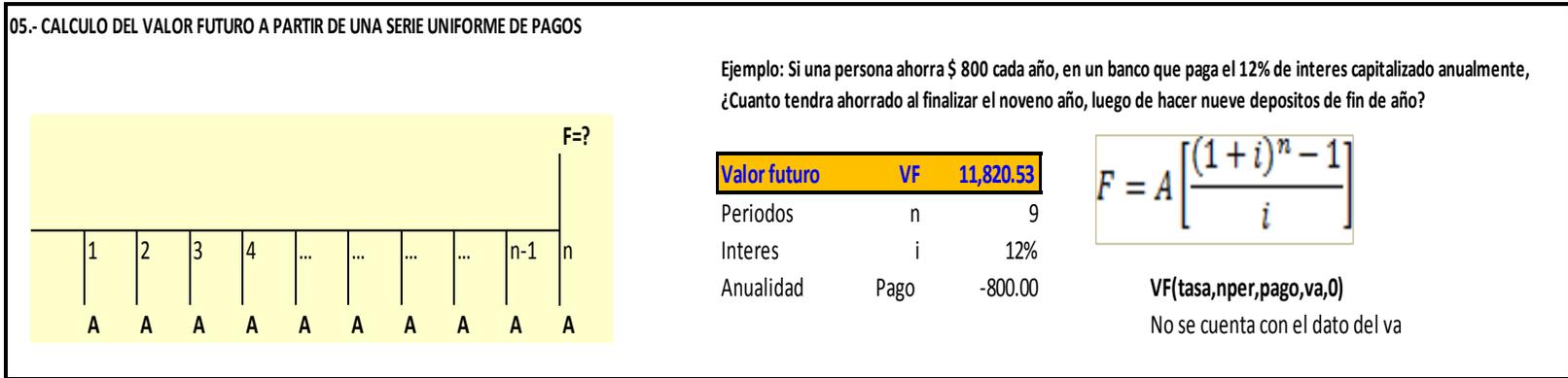


Figura 30: Cálculo del valor futuro a partir de una serie uniforme de pagos

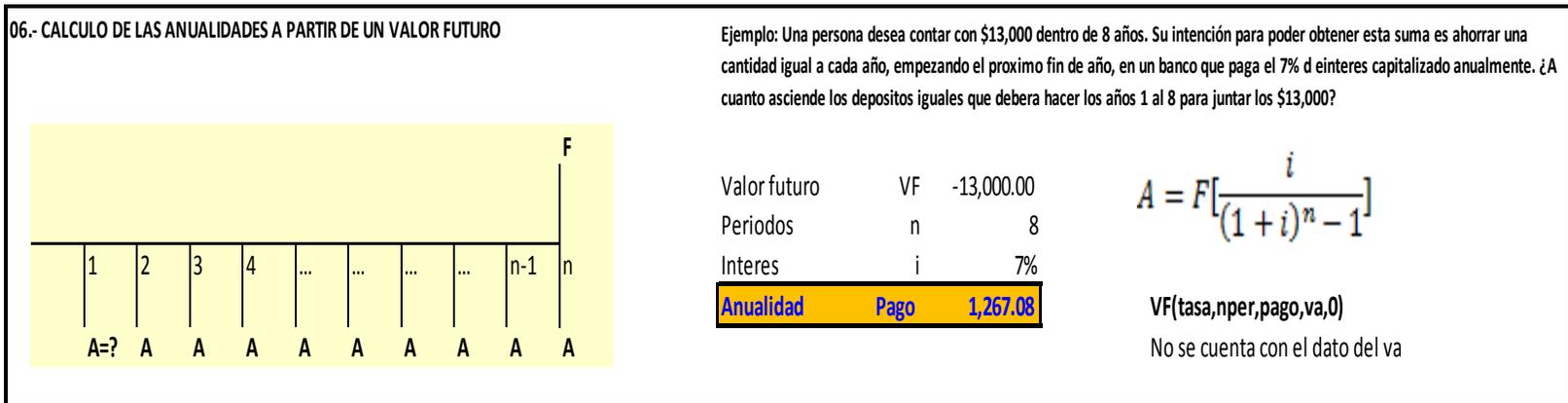


Figura 31: Cálculo de las anualidades a partir de un valor futuro

### 3.9.7.3 Ventajas y desventajas del VAN

- ❖ Es un indicador que toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir, considera el costo de oportunidad del capital del inversionista
- ❖ En el caso de proyectos mutuamente excluyentes, el van permite seleccionar eficazmente cual ejecutar.
- ❖ Es necesaria una tasa de actualización, que es el costo de oportunidad, el cual no es fácil obtener
- ❖ El van es mal entendido, ya que no es una tasa sino un valor absoluto.

### 3.9.8 Tasa interna de retorno – TIR

La tasa interna de retorno, TIR, es uno de los índices que más aceptación tiene por los proyectistas, ya que mide la rentabilidad de una inversión, que es una característica propia del proyecto. Matemáticamente viene a ser la tasa a la cual el VPN se hace igual a cero.

Este índice exige el máximo de cuidado en su aplicación pues en ocasiones puede dar un resultado distinto al obtenido por el VPN, cuando esto ocurre es porque el índice TIR no se aplicó correctamente y en tales circunstancias será necesario aplicar otra técnica para calcular la TIR, pues los resultados obtenidos con este último índice deben ser consecuentes con el VPN. El procedimiento que se use para calcular la TIR varía dependiendo del número

de alternativas a utilizar y de la forma como se encuentren distribuidos los ingresos y los egresos a lo largo del horizonte de planeación. La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero.

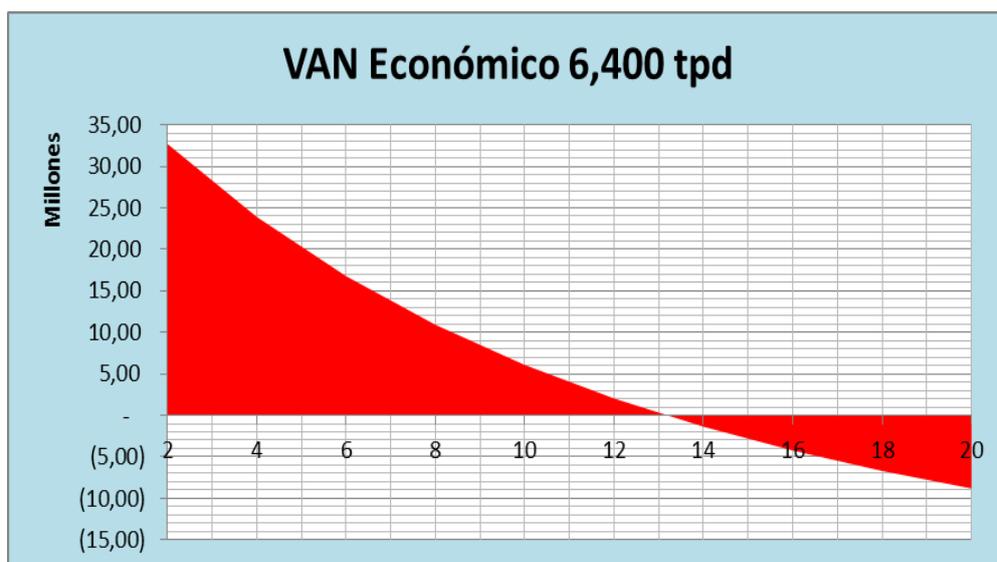
$$VAN = 0 = -I_0 + \sum_{i=0}^n \frac{B_i - C_i}{(1 + i)^n}$$

Previamente es necesario definir una tasa de descuento mínima (K).

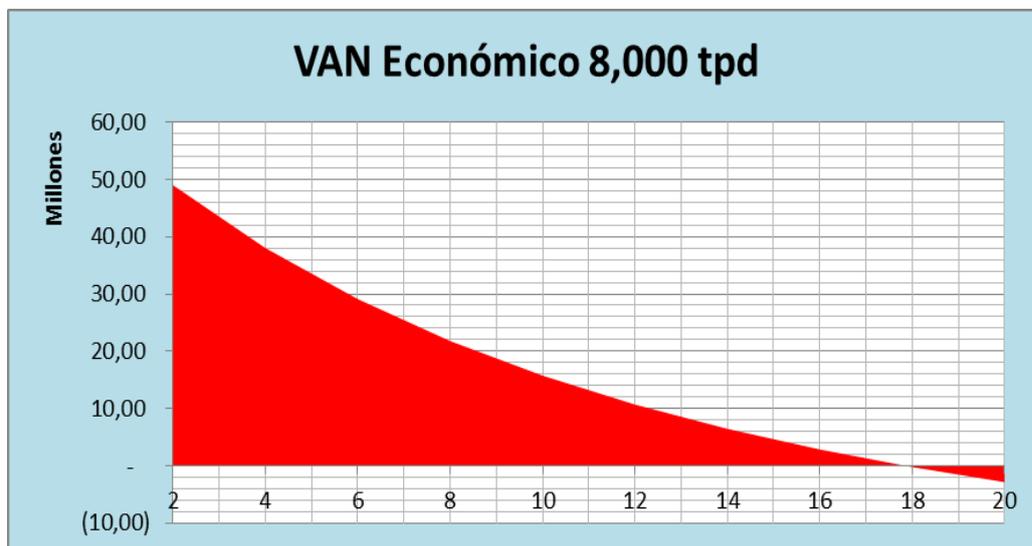
El proyecto será rentable si la TIR > i

### 3.9.9 Relación del VPN y la TIR

De la gráfica del Proyecto Túnel de Integración tenemos lo siguiente:



Esta grafica no indica que la TIR se encuentra entre el valor del 12% y 13%, cuyo valor más exacto se puede hallar por interpolación entre estos dos valores y al hacer los cálculos se obtiene una TIR de 13.16%, dicha tasa es superior a la tasa de interés considerada en el cálculo (expectativa del inversionista), el cual tiene un valor del 10%. Si los ingresos y los egresos figuran entreverados, puede ser que exista una TIR múltiple, puesto que habría varios cambios de signo en los coeficientes de la ecuación, sin embargo, hacemos énfasis en que no es obligatorio que existan varias tasas. Cabe recalcar que el VAN y la TIR del proyecto es para una producción de 6,400 tpd (escenario actual), si la producción se incrementa según los planes a mediano plazo se tendría lo siguiente:



Con el incremento de producción de las minas CAR y SCR a 8,000 tpd la TIR del proyecto se hace superior al escenario actual, lo cual era de esperarse

puesto que el ahorro de transporte incrementara. La TIR es de 18.74% para este nuevo escenario.

#### 3.9.9.1 Ventajas y desventajas de la TIR

- ❖ Proporciona un porcentaje de rentabilidad por lo que es fácilmente comprensible.
- ❖ Complementa la información proporcionada por el VAN.
- ❖ No es apropiado para proyectos mutuamente excluyentes si éstos tienen distinta escala o duración, o diferente distribución de beneficios.
- ❖ Un mismo proyecto puede tener diferentes tasas de retorno porque existen muchas soluciones a la ecuación (TIR múltiple).

#### 3.9.9.2 Tasa mínima atractiva de retorno

Existen ciertos proyectos cuya realización, implica un riesgo mayor que el que normalmente asume una persona cuando invierte a la tasa del inversionista, en tales circunstancias esa persona estaría dispuesta a invertir siempre y cuando la tasa que genere el proyecto sea superior a la tasa del inversionista con el fin de compensar el aumento de riesgo, a esta última tasa se le denomina Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR).

### 3.9.9.3 Cálculo del VAN y la TIR para el proyecto

Luego de haber profundizado en la teoría de los indicadores de evaluación de proyectos (VAN & TIR), estos mismo conceptos los he aplicado al Proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra – San Cristóbal – Andaychagua. Donde la variable a medir ha sido la disminución del OPEX de las operación, principalmente la actividad del transporte de mineral.

La construcción de este activo permitirá no solo reducir el costo de transporte principalmente, sino que también mejorará la productividad, los servicios mina, dará pie a encaminar otros proyectos operativos, minimizará los impactos al medio ambiente, se podrá transportar el relleno hidráulico, transporte de relaves mediante tuberías hacia las relaveras Chumpe o Andaychagua, mejoramiento de la ventilación, entre otros.

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGÍA DEL PROYECTO TESIS**

#### **4.1 METODOLOGÍA**

A lo largo de este capítulo se determina el método para justificar la construcción del Proyecto de Tesis Túnel de Integración de las Minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua. Así mismo se define el método de investigación y la forma en qué se ha recopilado la información necesaria y suficiente para el sustento técnico – económico del proyecto en mención.

## 4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente las minas se encuentran explotando el mineral según los planes anuales presentados, siendo el costo de transporte como se muestra en la tabla 47:

Tabla 47: Costo actual de transporte de mineral

Minas	Unidad	Producción	Costo de Transporte	Gasto Anual
			US\$/ton	US\$
CAR	tpd	1,800.00	5.45	3,580,650.00
SCR	tpd	4,600.00	6.62	11,114,980.00
AND	tpd	3,400.00	5.20	6,453,200.00
TIC	tpd	1,150.00	4.80	2,014,800.00
Total	tpd	10,950.00	5.80	23,163,630.00

La unidad Yauli valoriza anualmente alrededor de 23'163,630.00 dólares solo por transportar mineral hacia las diferentes plantas de tratamiento (Marh Túnel, Victoria y Andaychagua). Este costo ha sido calculado para la producción a mediano plazo y el cual se incrementará debido a la profundización de las minas, como se muestra en la tabla 48.

Tabla 48: Evolución de los costos de transporte

Minas	Unidad	Producción	Costo de Transporte - US\$/ton				
			2016	2017	2018	2019	2020
CAR	tpd	1,800.00	7.61	7.86	8.10	8.35	8.60
SCR	tpd	4,600.00	8.99	9.23	9.48	9.72	9.97
AND	tpd	3,400.00	5.20	6.21	6.90	7.59	8.28
TIC	tpd	1,150.00	4.80	5.20	5.60	6.00	6.40
<b>Total</b>	<b>tpd</b>	<b>10,950.00</b>	<b>7.14</b>	<b>7.64</b>	<b>8.04</b>	<b>8.44</b>	<b>8.84</b>

Como observamos el costo de transporte es una variable con pendiente positiva y la que se hace crítica en el tiempo no solo por el impacto en el Opex de la unidad, sino también por las características físicas de esta actividad en todo el ciclo de minado de las minas antes mencionadas. Dichas actividades como el incremento de volquetes para extraer el mineral y por ende el crecimiento de la cantidad monóxido que se manifestará con el incremento de ventiladores de mayor capacidad, mayor cantidad de raice bore, la merma en la productividad, la contratación de mayor mano de obra para cumplir los objetivos, son factores que generan un grado de complejidad a la operación minera en su conjunto.

Dado el análisis realizado en las visitas técnicas a las operaciones he podido observar una gran cantidad de labores, la congestión vehicular, el tiempo de traslado del personal hacia las labores (40-60 minutos) y traslado del shotcrete, lo cual genera tiempos muertos o demoras operativas que se manifiestan en el Opex de la unidad. De todos los problemas presentados se

ha realizado el análisis del ciclo de transporte de mineral principalmente ya que es el costo de mayor influencia que otros y se incrementará conforme profundice la mina.

### **4.3 HIPÓTESIS**

La coyuntura internacional de los precios de los metales base (Cu, Pb, Zn, Ag) han impactado directamente en el margen operativo de la unidad, manifestándose en una caída abrupta de las utilidades en los últimos 2 años (2014 y 2015). Así mismo dentro de los planes productivos de las minas esta la profundización de la misma la cual se manifestará en el incremento del costo del transporte de mineral y por ende el Opex, generando de esta manera menor margen operativo. En este marco coyuntural, la hipótesis presentada es reducir el costo del transporte de las minas Carahuacra, San Cristóbal en un 25% y 38% respectivamente y abastecer de mineral ante un crecimiento de tratamiento en la planta Andaychagua o abastecer de mineral desde Andayahcgua hacia la planta Victoria. En cualquiera de los escenarios dados, la idea es reducir el Opex de la unidad mediante la reducción del costo de transporte de mineral principalmente.

### **4.4 DISEÑO O MODELO UTILIZADO**

Dado la metodología de calcular los costos unitarios y total de la actividad del transporte de mineral de las zonas de explotación hacia las plantas de

tratamiento en (\$/ton o USD) mediante el Proyecto de Tesis Túnel de Integración de las Minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua es descriptivo y cuantitativo manifestándose en la generación de valor en la cadena del negocio.

#### 4.5 PROCEDIMIENTO

Se analizará el costo unitario en US\$/ton del sistema de transporte de mineral de las zonas de explotación de la minas hacia las plantas concentradoras mediante el uso del Túnel de Integración, comparándolo con el costo actual del transporte por el Túnel Victoria y Superficie. Esta variación deberá de generar un ahorro a través de los años, generando un flujo hasta el cierre de la mina o hasta agotar las reservas de mineral. Para el análisis del Proyecto Tesis, he realizado un análisis minucioso de todos los costos (equipos, mano de obra y recursos) en que incurrirá la construcción del activo, obteniendo un Capex que servirá de input para su comparación con el ahorro en el costo de transporte y aplicando las herramientas de la evaluación de proyectos (VAN & TIR), sustentar económicamente su construcción en el mediano plazo.

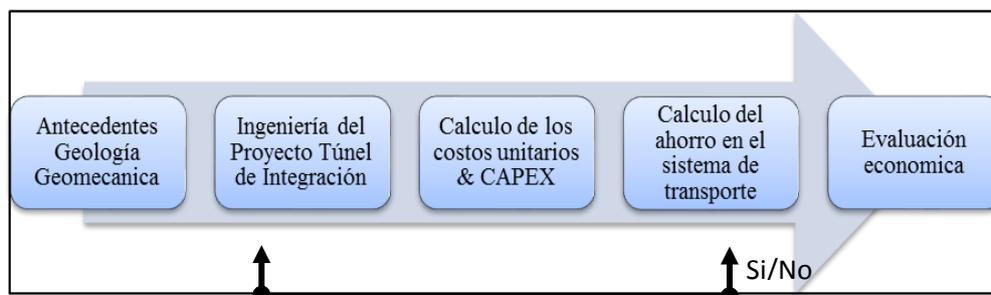


Figura 32: Procedimiento de viabilidad del proyecto

## **CAPITULO V**

### **RESULTADOS**

En los capítulos anteriores se explicó la base teórica sobre la que se sustenta el presente proyecto de tesis Túnel de Integración de las Minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua. En esta parte se ha calculado todos los costos para la construcción de dicho activo así como los beneficios en ahorro del Opex que generará cuando se realice su uso.

Posterior al cálculo de los costos y del beneficio se ha determinado el VAN y TIR del proyecto así como simulaciones para incrementos de producción en el mediano plazo.

## 5.1 CALCULO DE LOS COSTOS

Los costos se han distribuido según se muestra en la tabla 49, esto debido al tipo de contrato con la empresa constructora; el contrato es el OPEN BOOK y se paga lo que realmente se gasta en un periodo de tiempo.

Tabla 49: Distribución de los costos

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
5.1.1	Mano de obra	US\$
5.1.2	Gastos generales	US\$
5.1.3	Materiales de perforación	US\$
5.1.4	Herramientas	US\$
5.1.5	EPP'S	US\$
5.1.6	Equipos	US\$
5.1.7	Servicios túnel	US\$
5.1.8	Sostenimiento	US\$
5.1.9	Explosivos	US\$
5.1.10	Transporte	US\$
5.1.11	Infraestructura	US\$

### 5.1.1 Mano de obra

Debido a que el contrato es de tipo Open Book, se paga lo que realmente se paga, la mano de obra ha sido calculada fuera del P.U de avance del túnel. El detalle del costo de la mano de obra por puesto de trabajo se encuentra en el anexo 15 y 16.

Tabla 50: Costo de la mano de obra

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	4,342,786.81	511.88
Cámara	US\$	550,270.61	511.88
Refugio	US\$	143,326.30	511.88
Desquinche	US\$	377,255.29	511.88
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>5,413,639.01</b>	<b>511.88</b>

### 5.1.2 Gastos generales

La construcción del proyecto es tercerizada y la ejecutará una empresa especializada en el rubro, por tal motivo se ha presupuestados sus gastos generales, el detalle de dicho cálculo se muestra en el anexo 17 y 18.

Tabla 51: Gastos generales

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	1,407,291.30	165.88
Cámara	US\$	178,316.61	165.88
Refugio	US\$	46,445.26	165.88
Desquinche	US\$	122,250.55	165.88
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>1,754,303.73</b>	<b>165.88</b>

### 5.1.3 Materiales de perforación

Los materiales y accesorios de perforación han sido considerados como actividad específica debido a que es posible optimizarlo mediante un control

detallado de los jefes de guardia. El detalle de los cálculos se muestra en el anexo 19.

Tabla 52: Costo de aceros, accesorios y materiales de perforación

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	1,037,215.30	122.26
Cámara	US\$	92,204.15	85.77
Refugio	US\$	13,118.54	46.85
Desquinche	US\$	60,639.71	82.28
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>1,203,177.69</b>	<b>116.62</b>

#### 5.1.4 Herramientas

La compra de herramientas para todo el proyecto ha sido considerada para las dos etapas, dichos artículos quedarán para el beneficio del proyecto, ver anexo 20.

Tabla 53: Costo de las herramientas

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	7,585.58	0.89
Cámara	US\$	961.16	0.89
Refugio	US\$	255.91	0.91
Desquinche	US\$	658.95	0.89
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>9,461.61</b>	<b>0.89</b>

### 5.1.5 Materiales de seguridad y EPP's

He presupuestado los recursos de seguridad a utilizar esto con el fin de cumplir con los estándares operativos y calidad en el trabajo entregado. El anexo 21 y 22, detalla las necesidades de dichos recursos durante el horizonte del proyecto.

Tabla 54: Costo de los EPP's y materiales

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	35,114.33	4.14
Cámara	US\$	563.77	0.52
Refugio	US\$	78.19	0.28
Desquinche	US\$	264.98	0.36
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>36,021.27</b>	<b>4.05</b>

### 5.1.6 Equipos

Dentro del plan operativo presentado he considerado la compra de equipos para cada actividad a realizar, dicho análisis de costo horario de los mismos se encuentra en el anexo 23, 24 y 25, así mismo se presentan los cálculos de rendimiento y eficiencia por estas actividades.

Tabla 55: Costo de equipos

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	4,325,465.69	509.84
Cámara	US\$	326,313.66	303.55
Refugio	US\$	23,502.74	83.94
Desquinche	US\$	230,922.56	313.33
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>4,906,204.65</b>	<b>484.83</b>

### 5.1.7 Servicios Túnel

Al igual que en toda operación minera, se necesita de los servicios de agua, aire, iluminación , colocación de alcayatas, instalación de mangas de ventilación entre otros, en el presente apartado se ha calculado los costos al detalle para satisfacer las necesidades del proceso constructivo. En el anexo 26 y 27, se encuentra el detalle de dicho análisis.

Tabla 56: Costo de los servicios túnel

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	949,066.54	111.87
Cámara	US\$	-	-
Refugio	US\$	-	-
Desquinche	US\$	82,444.84	111.87
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>1,031,511.39</b>	<b>111.87</b>

### 5.1.8 Sostenimiento

En base al informe geomecánico, se ha calculado los índices de los elementos de sostenimiento aplicar para toda la construcción del Proyecto Túnel de Integración. Hago hincapié que en la etapa 02, debido al tipo de terreno que se tiene (Filitas), el proceso constructivo se hace largo y tedioso, ya que en esa etapa los avances son cortos y el sostenimiento aplicar es pesado. El anexo 28 presenta el detalle de las cantidades y costos de los elementos de sostenimiento para el proyecto.

Tabla 57: Costos de los elementos de sostenimiento

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	11,411,455.51	1,345.06
Cámara	US\$	855,152.87	795.49
Refugio	US\$	73,081.22	261.00
Desquinche	US\$	855,136.83	1,160.29
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>13,194,826.43</b>	<b>1291.461</b>

### 5.1.9 Explosivos y accesorios de voladura

Este recurso será proporcionado por la empresa minera, de la misma manera que en los anteriores análisis, el detalle de encuentra plasmado en el anexo 09.

Tabla 58: Costo de explosivos y accesorios de voladura

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	665,388.02	78.43
Cámara	US\$	54,398.50	50.60
Refugio	US\$	8,933.25	31.90
Desquinche	US\$	32,655.52	44.31
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>761,375.29</b>	<b>74.43</b>

### 5.1.10 Transporte

El traslado de desmonte se realizará hacia el botadero huaripampa, para ello se ha realizado todo un análisis detallado del costo el cual se encuentra explicado en el anexo 30.

Tabla 59: Costo del transporte de desmonte

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	1,749,766.95	206.24
Cámara	US\$	117,268.84	109.09
Refugio	US\$	7,636.11	27.27
Desquinche	US\$	99,240.46	134.65
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>1,973,912.35</b>	<b>196.18</b>

### 5.1.11 Infraestructura

Para tener un buen avance del túnel y cumplir con el horizonte del proyecto, es necesario construir raice bore en la etapa dos, esta inversión es de vital importancia para los fines que se pretende obtener.

Tabla 60: Costo de infraestructura

<b>Labor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>US\$/mt</b>
Túnel	US\$	2,079,366.66	245.09
Cámara	US\$	-	0.00
Refugio	US\$	-	0.00
Desquinche	US\$	180,633.34	245.09
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>2,260,000.00</b>	<b>245.09</b>

## 5.2 CAPEX TOTAL DEL PROYECTO

Dado el análisis de todos los costos que ocurrirán para la construcción del Proyecto Túnel de Integración, hemos determinado que la inversión será de 32,544,433.43 US\$. Este monto se detalla en el siguiente cuadro.

Tabla 61: Inversión total del proyecto Túnel de Integración

<b>Descripción</b>	<b>Unid</b>	<b>Túnel</b>	<b>Cámara</b>	<b>Refugio</b>	<b>Desquinche</b>	<b>Total</b>
Mano de obra	US\$	4,342,786.81	550,270.61	143,326.30	377,255.29	5,413,639.01
Gastos generales	US\$	1,407,291.30	178,316.61	46,445.26	122,250.55	1,754,303.73
Materiales de perforación	US\$	1,037,215.30	92,204.15	13,118.54	60,639.71	1,203,177.69
Herramientas	US\$	7,585.58	961.16	255.91	658.95	9,461.61
EPP'S	US\$	35,114.33	563.77	78.19	264.98	36,021.27
Equipos	US\$	4,325,465.69	326,313.66	23,502.74	230,922.56	4,906,204.65
Servicios túnel	US\$	949,066.54	-	-	82,444.84	1,031,511.39
Sostenimiento	US\$	11,411,455.51	855,152.87	73,081.22	855,136.83	13,194,826.43
Explosivos	US\$	665,388.02	54,398.50	8,933.25	32,655.52	761,375.29
Transporte	US\$	1,749,766.95	117,268.84	7,636.11	99,240.46	1,973,912.35
Infraestructura	US\$	2,079,366.66	-	-	180,633.34	2,260,000.00
<b>Total</b>	<b>US\$</b>	<b>28,010,502.69</b>	<b>2,175,450.16</b>	<b>316,377.53</b>	<b>2,042,103.04</b>	<b>32,544,433.43</b>

Para cada actividad del proceso constructivo del Proyecto Túnel de Integración se ha calculado el costo unitario del mismo a fin de poder compararlo con otros proyectos de similar envergadura. Es necesario recordar que el Túnel de Integración es minero y no será de intereses público.

Tabla 62: Costos unitarios del proyecto Túnel de Integración

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Túnel</b>	<b>Camara</b>	<b>Refugio</b>	<b>Desquinche</b>
Programa de avances	Metros	8,484.00	1,075.00	280.00	737.00
Mano de obra	US\$/mt	511.88	511.88	511.88	511.88
Gastos generales	US\$/mt	165.88	165.88	165.88	165.88
Materiales de perforación	US\$/mt	122.26	85.77	46.85	82.28
Herramientas	US\$/mt	0.89	0.89	0.91	0.89
EPP'S	US\$/mt	4.14	0.52	0.28	0.36
Equipos	US\$/mt	509.84	303.55	83.94	313.33
Servicios túnel	US\$/mt	111.87	-	-	111.87
Sostenimiento	US\$/mt	1,345.06	795.49	261.00	1,160.29
Explosivos	US\$/mt	78.43	50.60	31.90	44.31
Transporte	US\$/mt	206.24	109.09	27.27	134.65
Infraestructura	US\$/mt	245.09	-	-	245.09
Total	US\$/mt	3,301.57	2,023.67	1,129.92	2,770.83
<b>Budget</b>	<b>US\$</b>	<b>28,010,502.69</b>	<b>2,175,450.16</b>	<b>316,377.53</b>	<b>2,042,103.04</b>

Tabla 63: Costos unitarios por metro lineal de avance

<b>Labor</b>	<b>Avance - mt</b>	<b>P.U - US\$/mt</b>	<b>CAPEX - US\$</b>
Túnel	8,484.00	3,301.57	28,010,502.69
Camara	1,075.00	2,023.67	2,175,450.16
Refugio	280.00	1,129.92	316,377.53
Desquinche	737.00	2,770.83	2,042,103.04
<b>CAPEX TOTAL</b>			<b>32,544,433.43</b>
<b>P.U US\$/MT</b>			<b>3,529.38</b>

### 5.3 CALCULO DE LOS COSTOS ACTUALES

Dada la coyuntura actual de la caída de los precios de los metales a diciembre del 2014, los costos al cierre del mes de febrero del 2015 son los que se muestran en el tabla 64, especificando al detalle por actividad en US\$/ton.

Tabla 64: Costo de las actividades del ciclo de minado

<b>Descripción</b>	<b>SCR</b>	<b>CAR</b>	<b>AND</b>	<b>TIC</b>
Perforación	3.9	3.4	3.9	5.4
Voladura	3.4	3	2.5	3.2
Sostenimiento	9.7	4.5	11.4	8.7
Limpieza	7.3	5.4	3.1	4.8
<b>Transporte</b>	<b>6.62</b>	<b>5.45</b>	<b>5.6</b>	<b>3.3</b>
Relleno	0.9	0.8	10.5	0
Servicios	5.3	1.9	3	5.4
Bombeo	0.8	0.8	2.3	5.5
Supervisión	1.7	1.1	1	2.4
Otros	3.2	4.1	4	4
<b>Total</b>	<b>42.82</b>	<b>30.45</b>	<b>47.3</b>	<b>42.7</b>

De la tabla 64 se aprecia que el costo de transporte representa el 16% y 18% del costo de producción de las minas SCR y CAR respectivamente, además este costo va en aumento conforme se profundicen las minas.

#### **5.4 ESCENARIO ACTUAL DEL TRANSPORTE**

Las minas Carahuacra y San Cristóbal trasladan su mineral hacia la planta victoria siguiendo 02 rutas principales, las cuales son:

- ❖ Ruta 01: Zona de explotación hacia la planta Victoria por el Túnel Victoria.
- ❖ Ruta 02: Zona de explotación hacia la planta Victoria por superficie.

De estas dos rutas la mina Carahuacra traslada su mineral en un 100%, mientras que la mina San Cristóbal solo el 35%, siendo el 65% trasladado por superficie; la mina Andaychagua traslada el 100% de mineral por sus rampas 04 y 05. La tabla 65 muestra las rutas y distancias para trasladar el mineral.

Tabla 65: Rutas de traslado de mineral

<b>Análisis</b>	<b>Ton/día</b>	<b>Ton/mes</b>	<b>Ruta</b>	<b>Distancia</b>
CAR	1,800.00	54,000.00	Túnel victoria	9.50
SCR	1,600.00	48,000.00	Túnel victoria	9.50
SCR	3,000.00	90,000.00	Superficie	16.70
AND	3,400.00	102,000.00	Rampa principal	4.50
<b>Total</b>	<b>9,800.00</b>	<b>294,000.00</b>	<b>Ponderado</b>	<b>9.97</b>

La tabla 66, detalla el costo de trasladar el mineral por la ruta 01. Siendo la ruta principal el Túnel Victoria con locomotoras y rieles.

Tabla 66: Costo de traslado de mineral – Ruta 01

Desde	Hasta	Distancia (Km)	C.U (\$/ton)	CAR	SCR	Total Mes
Nv 1120	Chute Nv820	4.00	2.95	159,300.00	141,600.00	300,900.00
Chute Nv820	Planta Victoria	5.50	2.50	135,000.00	120,000.00	255,000.00
<b>Nv 1120</b>	<b>Planta Victoria</b>	<b>9.50</b>	<b>2.69</b>	<b>294,300.00</b>	<b>261,600.00</b>	<b>555,900.00</b>

La tabla 67, detalla el costo de trasladar el mineral por la ruta 02. Siendo la ruta principal la superficie utilizando para ello la vía publica actual. En este caso existen costos como los de mantenimiento de vías, el cual no ha sido incluido en este análisis.

Tabla 67: Costo de traslado de mineral – Ruta 02

Desde	Hasta	Distancia (Km)	C.U (\$/ton)	CAR	SCR	Total Mes
Nv 1120	C-500	7.80	5.13	0	461,700.00	461,700.00
C-500	Planta Victoria	8.90	2.12	0	190,800.00	190,800.00
<b>Nv 1120</b>	<b>Planta Victoria</b>	<b>16.70</b>	<b>3.53</b>	<b>0.00</b>	<b>652,500.00</b>	<b>652,500.00</b>

Realizando una suma de costos de la ruta 01 y ruta 02 obtenemos que el costo total del transporte para trasladar el mineral y colocarlo en planta victoria es de 1'208,400.00 US\$, este costo es el que se paga mensualmente a las contratista por trasladar el mineral y colocarlo en las tolvas de Planta Victoria o en su defecto trasladarlo a la Planta Marh Túnel, cuyo costo es aún más elevado y bordea los 8.23 US\$/ton.

## 5.5 ESCENARIO DEL TRANSPORTE CON EL TÚNEL DE INTEGRACIÓN

Con la construcción del Túnel de Integración lo que se conseguirá será disminuir los costos de transporte de mineral en un 30% (ponderado de CAR y SCR), es decir 3.89 US\$/ton, este impacto en el OPEX es crucial para un eventual incremento de producción de las Plantas Victoria (8,000 tpd) y Andaychagua (6,000 tpd).

Puesto que el Túnel de Integración será horizontal (0.3% de pendiente), el costo de trasladar el mineral será de 1.14US\$/ton según lo muestra el cálculo de la contratista.

Al reemplazar, el costo de transporte por el Túnel de Integración a las mismas tablas 66 y 67, obtenemos lo siguiente:

Tabla 68: Nuevo costo de traslado de mineral por la ruta 01

Desde	Hasta	Distancia (Km)	C.U (\$/ton)	CAR	SCR	Total Mes
Nv 1120	Chute Nv820	4	2.95	159,300.00	-	159,300.00
Chute Nv820	Planta Victoria	5.5	1.14	61,560.00	-	61,560.00
<b>Nv 1120</b>	<b>Planta Victoria</b>	<b>9.5</b>	<b>1.90</b>	<b>220,860.00</b>	<b>-</b>	<b>220,860.00</b>

Se puede observar que existe un tramo común y el cual se mantiene constante para cualquier escenario, ese tramo que va desde el Nv 1120 al Chute 820 es constante para el presente análisis.

Tabla 69: Nuevo costo de traslado de mineral por la ruta 02

<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>C.U (\$/ton)</b>	<b>CAR</b>	<b>SCR</b>	<b>Total Mes</b>
Nv 1120	Chute Nv820	4	2.95	-	407,100.00	407,100.00
Chute Nv820	Planta Victoria	5.5	1.14	-	157,320.00	157,320.00
<b>Nv 1120</b>	<b>Planta Victoria</b>	<b>9.5</b>	1.90	-	<b>564,420.00</b>	<b>564,420.00</b>

De los cálculos mostrados obtenemos que con la construcción del Túnel de Integración el costo de transporte tendrá una valorización mensual de 785,280 US\$.

## **5.6 AHORRO EN EL TRANSPORTE DE MINERAL**

Al calcular los costos incurridos en el traslado de mineral, se ha determinado que existe un ahorro entre el escenario actual y el escenario propuesto por el Túnel de Integración, dicho ahorro se muestra en la tabla 70.

Tabla 70: Ahorro en el costo del transporte de mineral

ITEM	CAR	SCR	TOTAL
Variación US\$	73,440.00	349,680.00	423,120.00
Ton/mes	54,000.00	138,000.00	192,000.00
Ahorro (US\$/ton)	<b>1.36</b>	<b>2.53</b>	<b>3.89</b>
Ton/Año	648,000.00	1,656,000.00	2,304,000.00
<b>Ahorro (US\$-Año)</b>	<b>881,280.00</b>	<b>4,196,160.00</b>	<b>5,077,440.00</b>

Podemos observar que el ahorro anual es de 5'077,440.00 US\$, monto que podría ser utilizado en la construcción del activo Proyecto Túnel de Integración. Este ahorro ha sido simulado para diferentes volúmenes de producción de las minas Carahuacra y San Cristóbal, dicha corrida se muestra en la tabla 71.

Tabla 71: Simulación del ahorro por incremento de producción

Ton/día	Ahorro US\$ - CAR	Ahorro US\$ - SCR	Total - US\$
4500	619,650.00	2,950,425.00	3,570,075.00
4600	633,420.00	3,015,990.00	3,649,410.00
4700	647,190.00	3,081,555.00	3,728,745.00
4800	660,960.00	3,147,120.00	3,808,080.00
4900	674,730.00	3,212,685.00	3,887,415.00
5000	688,500.00	3,278,250.00	3,966,750.00
5100	702,270.00	3,343,815.00	4,046,085.00
5200	716,040.00	3,409,380.00	4,125,420.00
5300	729,810.00	3,474,945.00	4,204,755.00
5400	743,580.00	3,540,510.00	4,284,090.00
5500	757,350.00	3,606,075.00	4,363,425.00
5600	771,120.00	3,671,640.00	4,442,760.00
5700	784,890.00	3,737,205.00	4,522,095.00

5800	798,660.00	3,802,770.00	4,601,430.00
5900	812,430.00	3,868,335.00	4,680,765.00
6000	826,200.00	3,933,900.00	4,760,100.00
6100	839,970.00	3,999,465.00	4,839,435.00
6200	853,740.00	4,065,030.00	4,918,770.00
6300	867,510.00	4,130,595.00	4,998,105.00
6400	881,280.00	4,196,160.00	5,077,440.00
6500	895,050.00	4,261,725.00	5,156,775.00
6600	908,820.00	4,327,290.00	5,236,110.00
6700	922,590.00	4,392,855.00	5,315,445.00
6800	936,360.00	4,458,420.00	5,394,780.00
6900	950,130.00	4,523,985.00	5,474,115.00
7000	963,900.00	4,589,550.00	5,553,450.00
7100	977,670.00	4,655,115.00	5,632,785.00
7200	991,440.00	4,720,680.00	5,712,120.00
7300	1,005,210.00	4,786,245.00	5,791,455.00
7400	1,018,980.00	4,851,810.00	5,870,790.00
7500	1,032,750.00	4,917,375.00	5,950,125.00
7600	1,046,520.00	4,982,940.00	6,029,460.00
7700	1,060,290.00	5,048,505.00	6,108,795.00
7800	1,074,060.00	5,114,070.00	6,188,130.00
7900	1,087,830.00	5,179,635.00	6,267,465.00
8000	1,101,600.00	5,245,200.00	6,346,800.00

## 5.7 CALCULO DEL VAN TIR

Con el análisis del ahorro en el costo del transporte de mineral, se determinó los ahorros anuales que generaría el Proyecto Túnel de Integración, este flujo fue llevado a una evaluación económica para determinar el VAN y el TIR dando los siguientes resultados, mostrados en la figura 33.

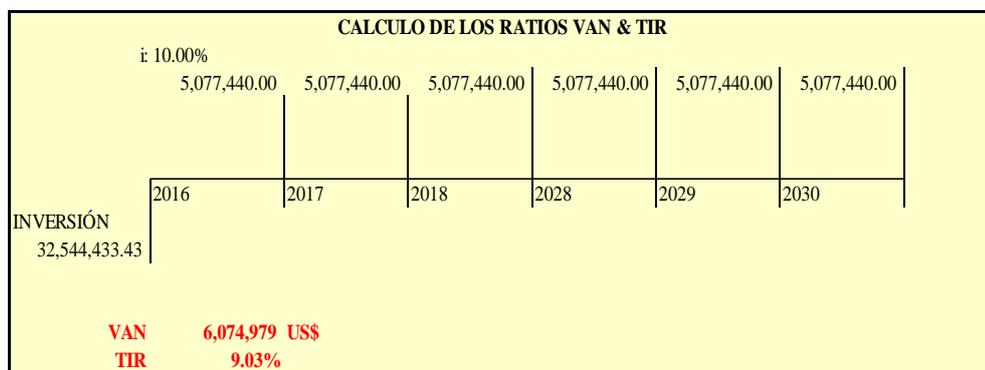


Figura 33: VAN y TIR escenario actual

Como se observa el VAN tiene un valor de 6'074,979 Dólares con una TIR de 9.03%. Cabe recalcar que el proyecto Túnel de Integración es un activo que se construirá hasta el cierre de las minas o hasta agotar las reservas.

Para el caso en el que la producción se incremente a 8,000 tpd el ahorro sería (según la tabla 70) 6'346,800.00 dólares, siendo el VAN y la TIR como se muestra en la figura 34.

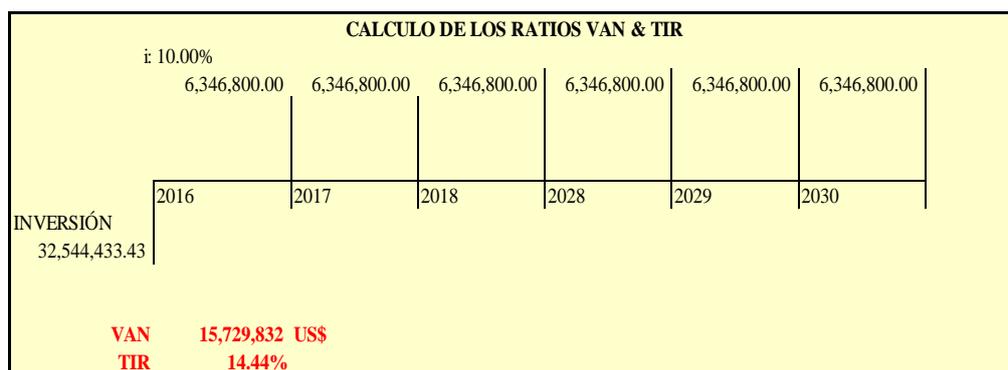


Figura 34: VAN y TIR con incremento de producción

Como se aprecia en este nuevo cálculo el VAN y la TIR incrementaron en valor, lo cual era evidente debido a que el ahorro es mayor.

Quiero agregar que a los cálculos no ingresaron los beneficios por ingreso natural de aire fresco al sistema de ventilación principal, reducción en el tiempo de traslado de relleno hidráulico a las minas, el incremento de la productividad de los trabajadores y supervisores, el mejoramiento del sistema de agua, aire y energía, reducción del costo de mantenimiento de las vías en superficie, menor impacto al medio ambiente y comunidades, transporte de relaves y/o concentrados, entre otros beneficios. La complejidad de agregar estos costos al flujo económico hará más robusto la hipótesis de su construcción dando mayor viabilidad al activo y reduciendo el tiempo de retorno de la inversión. Dicho estudio aún está siendo evaluado por el tesista y será presentado mediante un informe posterior.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Dada la demostración de la hipótesis y sustentada técnica – económicamente la viabilidad de la construcción del Proyecto Túnel de Integración de las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua, a continuación plasmará las conclusiones del presente proyecto de tesis.

1. La presente Proyecto de Tesis Túnel de Integración de las minas Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua se encuentra geológicamente en las zona de volcánico – intrusivo según la geología regional, así como en la zona de filitas.
2. La primera etapa de construcción del túnel se emplazara sobre la zona de volcánico – intrusivo siendo la segunda zona de filitas silicificadas y alteradas.

3. El Proyecto Túnel de Integración se encuentra en la estructura conocida como Domo de Yauli que abarca desde la mina Ticlio y se extiende hasta la mina Andaychagua.
4. El Proyecto Túnel de Integración se encuentra entre las fallas regionales de Ticlio y Chumpe.
5. El tipo de roca en la primera etapa es de regular a buena y en la segunda etapa es de regular a mala calidad según la tabla 08, criterios de clasificación geomecánica.
6. Para la zonificación geomecánica del eje del Túnel de Integración se han realizado pruebas de laboratorio como de campo, tomando como base el Túnel Victoria actual y el cruce 810, todos en el nivel 820.
7. El sostenimiento a aplicar será con pernos helicoidales de 10ft x 1pulg y shotcrete de 2 – 6” para la primera etapa, en la segunda etapa el sostenimiento será pesado con el uso de shotcrete, pernos helicoidales, mallas electrosoldadas y cimbras si así lo requiera el terreno.
8. El costo de sostenimiento a lo largo del Túnel de Integración será de 13’194,826 dólares, siendo el costo unitario de 1,247 US\$/ml. Cabe recalcar que el costo mostrado es un ponderado.
9. La excavación del Túnel de Integración será por 02 frentes y al encuentro, esto permitirá culminar su construcción en 37 meses según el timing de la figura 12.
10. El Proyecto Túnel de Integración ha sido dividido en 02 etapas, siendo cada etapa independiente de otra, esto a fin de utilizar el activo para la mina

CAR y SCR, la segunda etapa estará concentrada en la intersección con la mina AND.

11. Se realizarán 10,756.00 metros lineales de excavación, siendo 9,221 metros de excavación del Túnel de Integración (están incluidos los 737 metros de desquinche). La pendiente tendrá un valor de + 0.3%, iniciara en CAR y culminara en AND.

12. La sección final del Túnel de Integración será de 5.5 x 5.5 y tendrá una cuneta de 30cm x 40cm. El método de excavación será a cara completa utilizando para ello un jumbo de 02 brazos.

13. El sistema de agua industrial será tomada desde la quebrada Chumpe y mediante tuberías se trasladará agua a las operaciones unitarias. El desnivel existente es de 100 metros.

14. El explosivo a utilizar será la emulsión por sus propiedades físicas (resistente al agua) y su menor costo en comparación a la dinamita. También se hará uso de los DNE, armada de mecha lenta de 7ft y la mecha lenta.

15. Para la extracción del desmonte utilizaremos un scoop R1300G de 6.0 yd<sup>3</sup>, esto con la construcción de cámaras cada 200 metros proporcionarán una carguío óptimo para el proceso constructivo.

16. El diseño de la infraestructura del Túnel de Integración cumple con la normativa vigente D.S 055-2010 EM, se ha contemplado la construcción de refugios, cámaras de bombas, de rescate y subestaciones a lo largo de su eje.

17. La energía será proporcionada de la subestación principal de Planta Victoria hacia la subestación secundaria para el Proyecto, en el cual se ha

contemplado la compra de un trafo de 2.0MB – 10KV, capacidad suficiente para abastecer a las operaciones y a las oficinas.

18. Para el avance de la alimentación energética del Túnel de Integración se utilizarán las cámaras de almacenamiento y carguío cada 400 metros, ahí se construirán las subestaciones (10KV-440V) para abastecer de energía a la perforación principalmente.

19. Se tendrá 02 ventiladores de 150,000 CFM para inyectar aire limpio al frente de excavación y un ventilador de 60,000 CFM que ayudará a extraer el aire viciado en las condiciones desfavorables (progresiva +3,150). Un ventilador de 150,000 CFM estará ubicado en la boca túnel mientras que el otro en la progresiva +2,000, siendo el de 60,000 CFM en la progresiva 2,500.

20. El aire comprimido será abastecido mediante una compresora de 1,000 CFM, ubicado en la boca túnel de Proyecto y mediante tubería de 4" de diámetro será inyectado al frente de excavación.

21. En la zona de bombeo se utilizarán 02 bombas de 125 HP y una de 75HP que estará ubicada en el frente de excavación, el drenaje del Túnel será por las cunetas y tuberías de 4pulg.

22. El desmote a extraer será llevado a la desmontera Huaripampa, ubicada a 10.00 km del boca túnel. La extracción será con volquetes de 15m<sup>3</sup>, y se necesitará como máximo 4 volquetes en operación en las condiciones más desfavorables siendo su disponibilidad el 85%.

23. Para el sostenimiento con shotcrete se ha tercerizado su lanzado en el frente a una contratista, la cual estará siempre atento a su lanzado cuando las

condiciones del macizo lo requieran. Cabe recalcar que el proyecto tiene un ciclo en la guardia el cual debe cumplirse a cabalidad.

24. El Proyecto Túnel de Integración tiene un CAPEX de 32,544,433 US\$, este costo incluye mano de obra, equipos, materiales y herramientas así como la infraestructura que permitirá tener una operación eficiente

25. El costo unitario de la construcción del Túnel de Integración es de 3,529 US\$/ml, siendo el costo de sostenimiento el 35% del costo total, esto debido al sostenimiento pesado aplicar en la segunda etapa de construcción.

26. El ahorro a generar utilizando este activo es de 3.89 US\$/ton para las minas CAR y SCR principalmente, siendo el monto anual de 5'077,440 dólares manteniendo las condiciones de producción actuales (6,400 tpd).

27. Para una producción de 8,000 tpd, el ahorro a generar es de 6'346,800 dólares, esta variación en la producción hace mucho más rentable el proyecto. Es necesario percatarse que el horizonte del proyecto es hasta agotar las reservas de mineral o el cierre de las minas.

28. El VAN y TIR del Proyecto Túnel de Integración es de 6'074,979 dólares y 9.03% respectivamente. Esto para una producción actual de las CAR & SCR de 6,400 tpd.

29. El VAN y TIR del Proyecto Túnel de Integración es de 15'729,832 dólares y 14.44% respectivamente. Esto para una producción en el mediano plazo de las CAR & SCR de 8,000 tpd.

30. Es necesario llevar el control geomecánico durante la excavación del proyecto a fin de obtener información referente a las condiciones del macizo rocoso y así pueda servir de input para futuros proyectos de la corporación.

31. Es posible utilizar ANFO como agente de voladura en vez de Emulsión, este recurso generaría menores costos operativos, pero deberá realizarse un análisis muy minucioso del sistema de ventilación.
32. Para el caso del uso de la energía, se deberá analizar al detalle la implementación de cables de aluminio de 10KV a lo largo de toda la red principal de energía e implementar dicho recursos a la operación minera.
33. La construcción de dicho activo deberá ser tercerizada a una empresa especialista en el rubro, con supervisión de Volcan que fiscalice su excavabilidad.
34. Durante la excavación del proyecto se deberá realizar mapeos geológicos a fin de encontrar nuevos yacimientos potencialmente explotables de manera que se construya una infraestructura para la explotación del mismo.
35. Al culminar las etapas de construcción del proyecto, es necesario que planeamiento de mina aproveche al máximo dicho activo, utilizándolo como ingreso de aire, transporte de relleno hidráulico, energía, vía de escape, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Tunelería para el desarrollo

Pontificia Universidad Católica del Perú – Dirección de la Gestión de la Investigación

- ❖ Túneles

Colegio de Ingenieros del Perú – Curso de Túneles noviembre 2010

- ❖ Construcción de túneles

Universidad Austral de Chile – Tesis para optar el título de constructor civil.

- ❖ Construcción de túneles en roca

Universidad Politécnica de Cataluña – Túneles y Mecánica de Rocas

- ❖ Control de riesgos en obras de construcción

Asociación Chilena de Seguridad – Riesgos en la construcción de Túneles

- ❖ Sistemas de sostenimiento en tunelería

Alwag Systems – Sistemas de sostenimiento para la construcción de túneles y minería

- ❖ Túnel Kingsmill

Exposición de la Minera Perú Copper S.A – Octubre 2007

- ❖ Sostenimiento de túneles Huascacocha - Rimac

Universidad Ricardo Palma – Procedimientos de excavación y sostenimiento de túneles.

❖ Diseño de construcción de túneles

Pietro Lunardi – Milán, Italia. Sistemas de análisis de la deformación controlada

❖ Optimización en el diseño de túneles

Geotecnia Andina – Optimización en el diseño de túneles – Noviembre 2011

❖ Proyecto olmos

Gobierno Regional de Lambayeque – Proyecto Especial Olmos Tinajones Ago-2008

❖ Maquinarias, equipos en túneles

PM Putzmeister – Maquina, equipos y sistemas para la construcción de túneles

❖ Construcción de túneles

Ingeniería de Túneles – IGNEO, Capitulo VIII