

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



## **TESIS**

**“REDUCCIÓN DE COSTOS DE PERFORACIÓN ROTATIVA EN ROCAS  
DE ALTA RESISTENCIA COMPRESIVA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:  
ABRAHAM OROZCO CORNEJO**

**ASESOR  
MSc. Ing. LUIS QUIROZ BAZÁN**

**LIMA-PERÚ**

**2018**

**DEDICATORIA**

La presente tesis la dedico a todos los profesionales con vocación de la ingeniería de minas, esperando de mi parte les sea de gran utilidad. Además con mucho cariño y de forma muy especial a mis padres Armando y Rosa, mis hermanos Armando y Ariana y a mi querida enamorada Celina; que son mi gran motivación para mi desarrollo profesional.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas esas personas que me impulsaron y motivaron para poder lograr culminar mi tesis, con el fin de crecer profesionalmente.

Agradezco de forma muy especial a mi madre Rosa María, quien con su amor y ganas de verme ser un profesional, me impulsó desde niño a luchar y lograr alcanzar todas mis metas, con valores. Mi padre Armando, siempre dando la tranquilidad y alegría al hogar, el apoyo con el cual pude lograr culminar mis estudios hasta la universidad.

Agradezco a mi señorita enamorada Celina, que sin ella no hubiera podido cerrar esta etapa; siempre me motivó a dedicarle tiempo a mi tesis y culminarla lo mas antes posible.

Agradezco a la comunidad de docentes y administrativos de nuestra gloriosa FIGMM, en especial al Ing. Luis Quiroz, que con mucha disposición me apoyó en el desarrollo de la tesis de manera incondicional.

Para culminar, agradecer a todos los profesionales que me acompañan en la gran empresa COSAPI MINERIA; y además también me aconsejaron y apoyaron en esta etapa, a los ingenieros Raphael J., Rullit U., Juan A., José S., Gustavo S. y Jesús R. a los cuales estimo y estoy muy agradecido por su apoyo en mi crecimiento laboral.

## RESUMEN

Ésta tesis se desarrolló en el Megaproyecto de Ampliación Marcona, cuyo titular minero es Shougang Hierro Perú S.A.A.; la investigación está orientada a la operación minera unitaria de perforación.

El problema principal identificado dentro de ésta operación unitaria, es la baja productividad y como consecuencia el alto costo unitario en la perforación de rocas de alta resistencia compresiva tales como la cuarcita, mineral primario (magnetita) y actinolita. Las tres grandes causas son el alto consumo de brocas, baja eficiencia del proceso y bajo rango de penetración en las tres perforadoras eléctricas Sandvik 1190E.

Para reducir éstos impactos y contribuir con un menor costo unitario de perforación en rocas de alta resistencia compresiva, se evaluó el comportamiento de éstas variables según el tipo de roca perforada y se obtuvo un modelo matemático orientado a la geología de Marcona, el cual tiene como estructura base el modelo matemático realizado por el Ph.D Alan Bauer.

Luego de investigar el comportamiento de la perforación rotativa con broca tricónica, se realizó la mejora en la aplicación de variables operativas (*Pulldown*, Velocidad de rotación, Diámetro de perforación, etc.), la selección adecuada de los barrenos de perforación (Brocas) y la reducción de horas improductivas de las perforadoras.

## ABSTRACT

The present Thesis was developed at the Marcona Expansion Megaproject, whose holder is Shougang Hierro Perú S.A.A. This investigation is focused in the drilling mining operation.

The main problem identified within this operation is low productivity and, as a consequence, the high unit cost in the high strength compressive rocks' drilling such as quartzite, primary mineral (magnetite) and actinolite. The three biggest causes are high consumption of bits, low efficiency process and low penetration rate in the three electric drills Sandvik 1190E.

In order to reduce these impacts and get a lower unit cost of high strength compressive rocks' drilling, the behavior of these variables was evaluated according to the type of drilled rock and a mathematical model adjusted to the geology of Marcona was obtained. This model has as a base mathematical of the model of Ph.D Alan Bauer.

After investigating the behavior of rotary drilling, the results were the improvement in the application of operational variables (Pulldown, Rotary speed, Drilling diameter, etc.), the correct selection of drill bits and the reduction of non-productive drills' hours.

## INDICE

### CAPÍTULO I GENERALIDADES

<b>1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES .....</b>	<b>17</b>
1.1.1. Modelo matemático del Ph.D ALAN BAUER .....	17
1.1.1.1. Definición .....	17
1.1.1.2. Discusión.....	17
<b>1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>25</b>
1.2.1. Problema general .....	25
1.2.2. Problemas específicos.....	25
<b>1.3. OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
1.3.1. Objetivo general.....	25
1.3.2. Objetivos específicos.....	26
<b>1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>26</b>
1.4.1. Hipótesis general .....	26
1.4.2. Hipótesis específicas .....	26

### CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

<b>2.1. PERFORACIÓN.....</b>	<b>28</b>
2.1.1. Métodos de perforación.....	28
<b>2.2. PERFORACIÓN ROTATIVA CON BROCA TRICÓNICA.....</b>	<b>30</b>
2.2.1. Historia.....	30
2.2.2. Descripción General de Perforadora Rotativa.....	33
2.2.3. Columna de Barrenos de Perforadora Rotativa .....	34
2.2.4. Mecanismos Principales de Perforadora Rotativa .....	27
2.2.5. Factores que Influyen en la Perforación Rotativa .....	42
2.2.6. Criterios de Evaluación de Rendimiento .....	43
2.2.7. Rango de Penetración ( <i>Penetration Rate</i> – PR) .....	45
2.2.8. Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS).....	47
2.2.9. Brocas Tricónicas .....	48
2.2.9.1. Partes de las Brocas Tricónicas .....	49

2.2.9.2.	Tipos de Brocas Tricónicas.....	53
2.2.9.3.	Selección de Brocas Tricónicas.....	54
2.2.9.4.	Evaluación del Desgaste de Brocas Tricónicas.....	58
<b>2.3.</b>	<b>PRODUCTIVIDAD DE PERFORACIÓN.....</b>	<b>58</b>
2.3.1.	Indicadores de Productividad Operacional (Kpi's).....	58
2.3.2.	Indicadores de Productividad de Mantenimiento .....	60
2.3.3.	Distribución de Horas de Perforadora .....	62

### CAPÍTULO III

#### ASPECTOS GENERALES Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA OPERACIÓN MINERA MARCONA

<b>3.1.</b>	<b>ASPECTOS GENERALES DE LA OPERACIÓN MINERA .....</b>	<b>64</b>
3.1.1.	Ubicación Geográfica.....	64
3.1.2.	Historia .....	66
3.1.3.	Clima y Relieve .....	67
3.1.4.	Geología.....	68
3.1.4.1.	Geología Regional.....	68
3.1.4.2.	Columna Estratigráfica .....	69
3.1.4.3.	Geología Estructural .....	71
3.1.4.4.	Litología .....	72
<b>3.2.</b>	<b>SITUACIÓN ACTUAL DE LA OPERACIÓN MINERA.....</b>	<b>73</b>
3.2.1.	Descripción de la Operación Minera.....	73
3.2.2.	Alcance de la Operación Minera.....	73
3.2.3.	Fuerza Laboral .....	74
3.2.4.	Operaciones .....	75
3.2.4.1.	Perforación .....	76
3.2.4.2.	Producción y Rendimientos de Perforación .....	79
3.2.4.3.	Recursos de Perforación .....	80
3.2.5.	Costos .....	81
3.2.5.1.	Plan de Fases.....	82
3.2.5.2.	Costos por Fases.....	84
3.2.6.	Productividad.....	85
3.2.6.1.	Control de Productividad de Perforación.....	85
3.2.6.2.	Estadística de los Indicadores por Proceso .....	86
3.2.6.3.	Estadística de Eficiencia en Perforación .....	88

3.2.6.4. Rendimientos de Perforación .....	94
3.2.7. Mantenimiento de Equipos.....	96
3.2.7.1. Indicadores de Gestión de Mantenimiento.....	96

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>98</b>
4.1.1. Definición de Variables.....	98
4.1.1.1. Flujograma de Variables.....	101
4.1.1.2. Definición de Funciones Constantes (O&O Cost, FP) .....	102
4.1.2. Productividad Obtenida (Eff, PR, FP) .....	104
4.1.3. Vida Útil Obtenida en Barrenos de Perforación .....	106
4.1.4. Costo de Perforación Obtenida (\$/m, \$/t) .....	108
<b>4.2. PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>109</b>
4.2.1. Mejora de la Eficiencia de Perforación.....	109
4.2.2. Aplicación para Mejorar la Eficiencia .....	111
4.2.3. Mejora de Variables Operacionales (PD, RPM) .....	112
4.2.3.1. Estadística 2015 de Variables Operacionales.....	112
4.2.3.2. Modelo Matemático del Ph.D Alan Bauer para Sandvik 1190E .....	113
4.2.3.3. Sondajes y Muestreos Geotécnicos .....	113
4.2.3.4. Regresión Lineal de Variables Operacionales .....	115
4.2.3.5. Control de Variables Operacionales (PD, RPM) .....	116
4.2.3.6. Mejora del Rango de Penetración (m/h) .....	120
4.2.4. Mejora en Selección de Brocas Tricónicas.....	121
<b>4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....</b>	<b>124</b>
4.3.1. Funciones y Variables de Perforación 2017 vs 2015.....	124
4.3.2. Costos de Perforación 2017 vs 2015 .....	124
4.3.3. Beneficios Alcanzados .....	125
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>126</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>127</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Peso Ejercido sobre la Broca y su Diámetro.....	18
<b>Figura 2.-</b> Vida de las Brocas con Insertos de Carburo de Tungsteno según el Diámetro de Perforación en Rocas de Alta Resistencia Compresiva. ....	19
<b>Figura 3.-</b> Vida de la Broca (Insertos de Carburo de Tungsteno) Respecto al Peso sobre la Broca.....	21
<b>Figura 4.-</b> Costos de Perforación según el Tipo de Material y el Diámetro de Perforación Utilizado.....	22
<b>Figura 5.-</b> Costo de Perforación por Tonelada según el Tipo de Material y el Diámetro del Taladro Perforado. ....	23
<b>Figura 6.-</b> Producción por Hora de Material Perforado según Diámetro del Taladro. ....	24
<b>Figura 7.-</b> Columna de Barrenos de Perforación Rotativa. ....	35
<b>Figura 8.-</b> Conexiones BECO y API para Diferentes Diámetros de Barrenos de Perforación.....	36
<b>Figura 9.-</b> Ejes del Tipo de Montaje Sobre Orugas.....	37
<b>Figura 10.-</b> Distribución Media de la Potencia Instalada en una Perforadora Rotativa. ....	39
<b>Figura 11.-</b> Esquema de Circulación de Aire Comprimido en Broca Tricónica.....	41
<b>Figura 12.-</b> Combinación de los Mecanismos de Fuerza de Empuje ( <i>Pulldown</i> ), Rotación (RPM) y Evacuación de Detritus para Perforación Rotativa.....	42
<b>Figura 13.-</b> Manómetros de <i>Pulldown</i> y RPM en Unidad de Presión PSI, en una Perforadora Rotativa. ....	46
<b>Figura 14.-</b> Variables Operacionales de Perforación Rotativa; <i>Pulldown</i> , RPM y Velocidad de Barrido.....	47
<b>Figura 15.-</b> Conos con Insertos de Carburo de Tungsteno.....	50
<b>Figura 16.-</b> Estructuras de Corte o Conos con Dientes de Acero o Insertos de CT.....	50
<b>Figura 17.-</b> Componentes de Cojinetes a Rodillos y a Fricción ( <i>Journal</i> ) de Brocas Tricónicas.....	51
<b>Figura 18.-</b> Partes del Cuerpo de una Broca Tricónica con Rosca PIN.....	52
<b>Figura 19.-</b> Partes Principales de una Broca Tricónica con Insertos de Carburo de Tungsteno y Rosca API.. ....	53
<b>Figura 20.-</b> Geometría de los Conos de una Broca Tricónica, según la Dureza de la Roca	55
<b>Figura 21.-</b> Excentricidad de los Conos de una Broca Tricónica, según la Dureza de la Roca.....	55
<b>Figura 22.-</b> Distribución de Horas Cronológicas de una Perforadora Rotativa.....	63
<b>Figura 23.-</b> Mapa de Ubicación Geográfica del Distrito de Marcona, Provincia de Nazca, Ica. ....	65
<b>Figura 24.-</b> Puerto de San Nicolás año 2009.....	65
<b>Figura 25.-</b> Distrito San Juan De Marcona en el año 2004.....	66

<b>Figura 26.-</b> Unidad Minera Marcona - Shougang año 2015, Relieve Típico de la Zona...	67
<b>Figura 27.-</b> Histograma de Fuerza Laboral para la Etapa I.....	74
<b>Figura 28.-</b> Ciclo de Minado en la Operación Minera De Ampliación Marcona.....	75
<b>Figura 29.-</b> Plan de Perforación Mensual.....	76
<b>Figura 30.-</b> Equipo Auxiliar Realizando la Preparación de Plataforma de Perforación .....	76
<b>Figura 31.-</b> Malla de Perforación Marcada por el Área de Topografía .....	77
<b>Figura 32.-</b> Traslado de Perforadora Rotativa Eléctrica Sandvik 1190E.....	77
<b>Figura 33.-</b> Perforación Rotativa de Taladros por una Perforadora Sandvik 1190E .....	78
<b>Figura 34.-</b> Planos de Logueo Geológico.....	78
<b>Figura 35.-</b> Toneladas Perforadas en Etapa I de la Operación Minera De Ampliación Marcona .....	79
<b>Figura 36.-</b> Distribución de Personal de la Etapa I .....	80
<b>Figura 37.-</b> Equipos de Perforación Según el Año de Operación.....	81
<b>Figura 38.-</b> Costo Unitario de Minado Etapa I.....	84
<b>Figura 39.-</b> Costo Unitario de Perforación Etapa I.....	84
<b>Figura 40.-</b> Utilización Promedio de los Equipos de Perforación en año 2015.....	86
<b>Figura 41.-</b> Diagrama de Pareto de Actividades que Afectan la Utilización de Perforadoras.....	86
<b>Figura 42.-</b> Eficacia Promedio en Perforadoras en el año 2015.....	87
<b>Figura 43.-</b> Diagrama de Pareto de Actividades que Afectan la Eficacia de Perforadoras ..	87
<b>Figura 44.-</b> Eficiencia Ejecutada en los Equipos de Perforación en el año 2015 .....	88
<b>Figura 45.-</b> Diagrama de Pareto de Actividades Contributorias de Perforadoras en el año 2015.....	89
<b>Figura 46.-</b> Diagrama de Pareto de Actividades No Contributorias de Perforadoras.....	92
<b>Figura 47.-</b> Control de Cantidad de Metros Re-perforados Respecto a Metros de Producción .....	94
<b>Figura 48.-</b> Rangos de Penetración Mensuales 2015 (metros/hora).....	94
<b>Figura 49.-</b> Rangos de Penetración (m/h) Promedio 2015 por Tipo de Roca .....	95
<b>Figura 50.-</b> Rendimientos Brutos Mensuales 2015 (m/hM) .....	95
<b>Figura 51.-</b> Disponibilidad Mecánica de Perforadoras Rotativas en la Etapa I.....	96
<b>Figura 52.-</b> Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en Etapa I.....	97
<b>Figura 53.-</b> Tiempo Medio Para Reparaciones (MTTR) en Etapa I.....	97
<b>Figura 54.-</b> Diagrama de Flujo del Procedimiento de Mejora de Variables para la Reducción de Costos de Perforación.....	101
<b>Figura 55.-</b> Actividades Contributorias (1,6 horas – 13,3% de 12h).....	105
<b>Figura 56.-</b> Actividades No Contributorias (3,5 horas – 29,1% de 12h).....	106
<b>Figura 57.-</b> Estimación de las Constantes del Modelo Modificado del PhD. Alan Bauer. ..	116

<b>Figura 58.-</b> Comparación entre la Variable Operacional Pulldown de las Perforaciones del 2015 y del 2017.....	119
<b>Figura 59.-</b> Comparación entre la Variable Operacional Velocidad de Rotación de las Perforaciones del 2015 y del 2017.. .....	120
<b>Figura 60.-</b> Comparación de Rango de Penetración (PR) respecto a la Resistencia Compresiva (UCS) para las Perforaciones Rotativas del 2017 y 2015.....	121

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> Costos de Perforación y Eficiencia por Perforadora .....	20
<b>Tabla 2.-</b> Línea de Tiempo en la Invención de la Tecnología de Perforación Rotativa con Broca Tricónica .....	32
<b>Tabla 3.-</b> Clasificación de Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) por Tipo de Roca.....	48
<b>Tabla 4.-</b> Diseño de ST y TCI, según la Resistencia de la Roca a Perforar .....	54
<b>Tabla 5.-</b> Codificación Internacional IADC.....	57
<b>Tabla 6.-</b> Densidad por Tipo de Material .....	72
<b>Tabla 7.-</b> Litología del Yacimiento Marcona .....	73
<b>Tabla 8.-</b> Producción de la Etapa I por Tipo de Material Minado. ....	74
<b>Tabla 9.-</b> Perforadoras Utilizadas en Perforación Primaria y Secundaria .....	80
<b>Tabla 10.-</b> Fases de Costos de Perforación .....	82
<b>Tabla 11.-</b> Costo Diario de Perforación (Indicadores de Productividad) .....	83
<b>Tabla 12.-</b> Control de Actividades en Traslados Largos de Perforadoras .....	90
<b>Tabla 13.-</b> Cronograma para Cambio de Guardia en Personal de Perforación .....	91
<b>Tabla 14.-</b> Control de Traslados y Paradas de Perforadoras por Voladura .....	93
<b>Tabla 15.-</b> Sistema y Variables de Perforación .....	98
<b>Tabla 16.-</b> Cálculo de Variables del Sistema de Perforación .....	100
<b>Tabla 17.-</b> Factores de Perforabilidad de Rocas de Alta Dureza Compresiva.....	103
<b>Tabla 18.-</b> Costos de Perforadora Sandvik 1190E. h: hora cronológica, hM: hora máquina de perforadora.....	103
<b>Tabla 19.-</b> Costo de Propiedad y Operación de Perforación en el 2015.....	104
<b>Tabla 20.-</b> Eficiencia de Perforación 2015. hN: horas netas, hM: horas máquina, h: horas cronológicas .....	105
<b>Tabla 21.-</b> Productividad en el año 2015 de Rocas de Alta Resistencia Compresiva (PO, ACT, QZ).....	106
<b>Tabla 22.-</b> Vida Útil y Costo de Barrenos de Perforación en Rocas de Alta Resistencia Compresiva (PO, ACT Y QZ).....	107
<b>Tabla 23.-</b> Brocas Tricónicas Consumidas en el Año 2015 .....	107
<b>Tabla 24.-</b> Vida Útil de Brocas Tricónicas .....	107
<b>Tabla 25.-</b> Costo por Metro Perforado de Brocas Tricónicas PDB GX 722 por Tipo de Material Perforado (PO, ACT, QZ).....	108
<b>Tabla 26.-</b> Total Drilling Cost - TDC (\$/m) y Costo Unitario de Perforación – CUP (\$/t).....	109
<b>Tabla 27.-</b> Plan de Acción para Reducir Horas Improductivas.....	110
<b>Tabla 28.-</b> Mejora Cuantificada de las Actividades Improductivas del año 2017 respecto al 2015.....	111
<b>Tabla 29.-</b> Reducción de Horas Improductivas por Tipo de Actividad .....	111

<b>Tabla 30.-</b> Mejora en las Horas Improductivas de Perforación. ....	111
<b>Tabla 31.-</b> Cuadro Resumen de la Mejora de Indicadores de Eficiencia .....	112
<b>Tabla 32.-</b> Rango de Penetración y Variables Operacionales Aplicadas en la Perforación Rotativa en el 2015 .....	112
<b>Tabla 33.-</b> Sondajes Diamantinos y Muestreo Geotécnico de Taludes en Puntos de Perforación Rotativa 2017.....	114
<b>Tabla 34.-</b> Rango de Penetración (PR) y Variables Operacionales (PD, RPM) para Perforación Rotativa.....	114
<b>Tabla 35.-</b> Tabla de Cálculo de Variables de Regresión Lineal "X" y "Y" para obtener Constantes "a" y "b" del Modelo Matemático Modificado del Ph.D Alan Bauer .....	115
<b>Tabla 36.-</b> Variables Operacionales Promedio respecto a la Resistencia Compresiva.....	117
<b>Tabla 37.-</b> Tabla de Rangos de Penetración para la Perforadora Sandvik 1190E, Calculados por el Modelo Matemático Modificado del Ph.D. Alan Bauer .....	118
<b>Tabla 38.-</b> Resultados de Prueba de Brocas Tricónicas para Diferentes Fabricantes en Rocas con Mineral Primario (PO), Óxido (OX) y Desmonte (DESM).....	122
<b>Tabla 39.-</b> Número de Brocas Analizadas para la Comparación de Fabricantes .....	122
<b>Tabla 40.-</b> Cambio de Codificación IADC en Brocas Tricónicas para Rocas de Alta Resistencia Compresiva .....	123
<b>Tabla 41.-</b> Selección de Broca Tricónica Mediante los Indicadores de Costo de Perforación (TDC y CUP) .....	123
<b>Tabla 42.-</b> Funciones y Variables que Intervienen para la Valorización de la Mejora en el Proceso de Perforación.....	125
<b>Tabla 43.-</b> Comparación de Costos de Propiedad y Operación de Perforación .....	125
<b>Tabla 44.-</b> Costos de Perforación (TDC, CUP) por Tipo de Roca de Alta Resistencia Compresiva .....	126
<b>Tabla 45.-</b> Beneficios Generados en la Perforación Rotativa con Broca Tricónica, especificando el Ahorro Mensual y Anual por Tipo de Roca de Alta Resistencia Compresiva.....	126

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 01.-</b> Matriz de Consistencia .....	133
<b>Anexo 02.-</b> Componentes Principales de una Perforadora Rotativa de Accionamiento Eléctrico.....	135
<b>Anexo 03.-</b> Descripción de Componentes de una Perforadora Rotativa .....	137
<b>Anexo 04.-</b> Sistemas de Rotación Directos e Indirectos para Perforación Rotativa.....	138
<b>Anexo 05.-</b> Mecanismos de Empuje y Elevación de Columna de Perforación.....	139
<b>Anexo 06.-</b> Selección de Perforadoras según Tipo de Roca, Carga Aplicada y Diámetro de Perforación .....	140
<b>Anexo 07.-</b> Diámetros y Longitudes de Perforación según Tipo de Roca, Tipo de Perforación y Sector Industrial Aplicado .....	141
<b>Anexo 08.-</b> Características Técnicas de Perforadoras Rotativas (PER-02, PER-03 y PER-04) Eléctricas de Marca Sandvik, Modelo 1190E .....	142
<b>Anexo 09.-</b> Resultado de Prueba con Brocas Tricónicas .....	143
<b>Anexo 09A.-</b> Fabricante PDB 722 .....	144
<b>Anexo 09B.-</b> Fabricante SHAREATE 742 .....	144
<b>Anexo 09C.-</b> Fabricante MAMMOTH 742 .....	145
<b>Anexo 09D.-</b> Fabricante WLS 742.....	145
<b>Anexo 10.-</b> Plano de Ubicación de Sondajes Diamantinos y Muestreos Geotécnicos de Taludes en Mina 14.....	147

## INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación se centra en la operación minera unitaria de perforación, que es la primera dentro del Ciclo de minado.

El Capítulo I enfoca en detalle los estudios realizados por otros autores acerca de la perforación rotativa con broca tricónica, enfatizando el modelo matemático formulado por el PhD. Alan Bauer, realizado también en una mina de Hierro en Canadá. Luego se indicará la problemática, objetivos e hipótesis identificadas en la tesis.

El Capítulo II definirá la operación minera unitaria de perforación como proceso, los tipos de perforación existentes, análisis detallado de la perforación rotativa con broca tricónica, señalando cuáles son los factores que influyen en la selección de una perforadora rotativa, las variables operativas que afectan los resultados, los materiales consumibles tales como los barrenos de perforación, tipos y selección de brocas tricónicas. Adicional a estos conceptos, se definirá lo que es productividad, indicadores, Las herramientas de control y mejora continua de procesos, etc.

El Capítulo III detallará la ubicación geográfica, reseña histórica, clima, flora, fauna y la geología del yacimiento minero de hierro "Marcona". En este capítulo se observará que la litología de Marcona es una de las que contiene rocas con la más alta resistencia compresiva en el Perú y el mundo; debido a su alto contenido de minerales de hierro (Fe) y silicio (Si); muy aparte de su diversificada geología, la cual contiene las tres clases de rocas (Ígneas, sedimentarias y metamórficas). Además se mostrará la situación actual de la operación minera de ampliación Marcona, detallando el ciclo de minado, los equipos de

perforación rotativa utilizados, la productividad obtenida en la operación, las dificultades presentadas en el proceso, el consumo de brocas y barrenos de perforación.

El Capítulo IV analizará las constantes, variables, funciones e indicadores que intervienen en el sistema de perforación rotativa, asimismo se muestra un diagrama de flujo que interrelaciona estas variables con el fin de mejorarlas y reducir los costos, luego se visualiza los resultados de las perforaciones en roca dura (cuarcita, magnetita, actinolita) obtenidas en el 2015. En la parte experimental, se advierten las mejoras aplicadas a las funciones del rango de penetración, eficiencia de perforación y selección de broca tricónica; además, se estimará por el método de regresión lineal el modelo matemático modificado del Ph.D. Alan Bauer, con el fin de cuantificar y demostrar la mejora de la correcta combinación de las variables operacionales y capacidad de perforadora. En la contrastación de la hipótesis, se mostrará los cuadros resumen de los resultados obtenidos en el año 2017, tras la ejecución de las mejoras para la reducción de costos en perforación.

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES

##### 1.1.1. Modelo matemático del Ph.D ALAN BAUER

###### 1.1.1.1. Definición

Mediante diversas pruebas de campo, durante 7 años, en una mina de hierro en Canadá, estudio realizado por el Dr. Alan Bauer, se obtuvo que la velocidad de penetración y la resistencia compresiva de la roca tenían una buena correlación. Además, las pruebas mostraban que la velocidad de rotación y el peso ejercido entre el diámetro de la broca se relacionaban linealmente con la velocidad de penetración. Estas pruebas se realizaron con una broca de insertos de carburo de tungsteno.

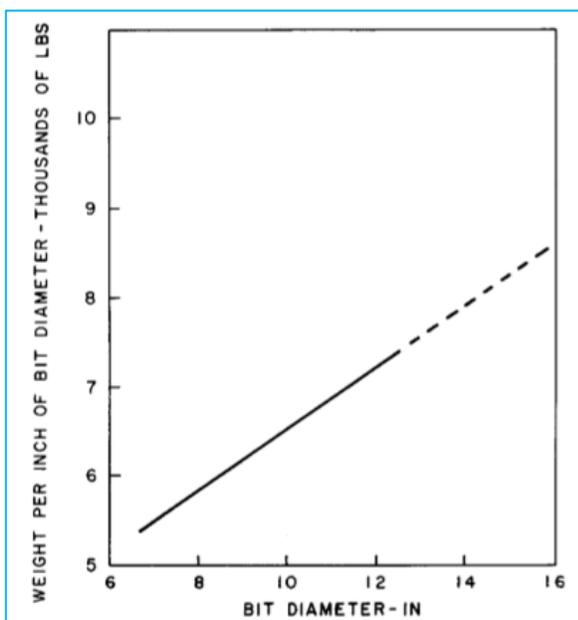
###### 1.1.1.2. Discusión

Con el modelo matemático señalado se puede obtener la velocidad de penetración, el problema consiste en determinar qué valores de *pulldown* y velocidad de rotación se debe

aplicar a cada tipo de roca con el fin de incrementar la velocidad de penetración y minimizar el daño en las brocas.

Con este objetivo, el autor observó en campo, que para rocas suaves era adecuado aplicar una velocidad de rotación de 90 a más RPM y para rocas medias a duras utilizar de 80 a menos RPM. En el caso del Peso sobre la broca (*Pulldown*), depende del diámetro de broca a utilizar.

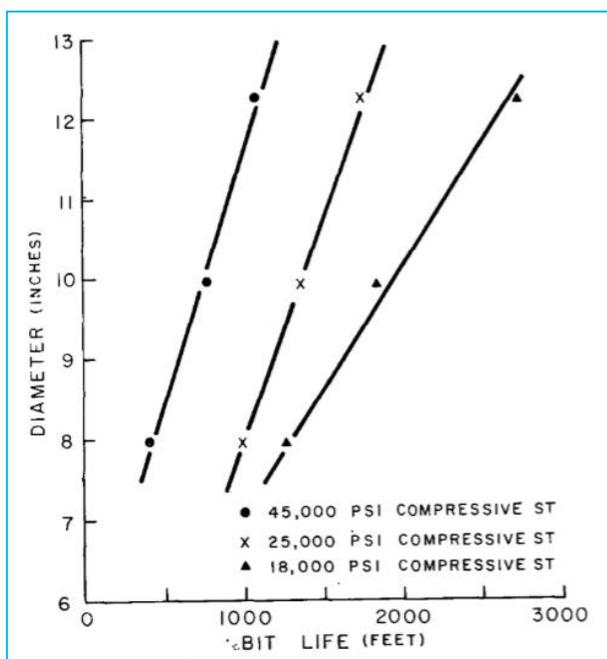
El autor realizó pruebas de perforación usando brocas tricónicas de diferentes diámetros en una misma roca, concluyendo que el cociente de  $W/\phi$  ( $W$ : Empuje sobre la broca,  $\phi$ : Diámetro de la broca) es proporcional a  $\phi$  como se muestra en la **Figura 1**:



**Figura 1.-** Peso Ejercido sobre la Broca y su Diámetro.

**Fuente:** Ph.D Alan Bauer.

Asimismo, el autor demuestra la relación que existe entre la velocidad de perforación y los diversos tipos de roca dura, tomando como parámetro principal la resistencia compresiva uniaxial.



**Figura 2.- Vida de las Brocas con Insertos de Carburo de Tungsteno según el Diámetro de Perforación en Rocas de Alta Resistencia Compresiva.**

**Fuente: Ph.D Alan Bauer**

En la **Figura 2**, se observa el comportamiento de la vida de las brocas (Insertos de carburo de tungsteno) respecto al diámetro de las mismas, para rocas intactas de alta resistencia, mostrando que mientras la roca tenga una resistencia compresiva mayor, ésta vida disminuye sustancialmente.

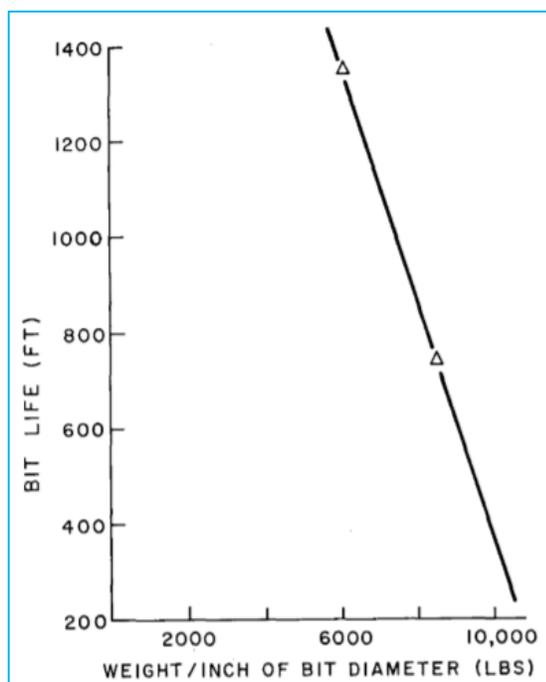
**Tabla 1.- Costos de Perforación y Eficiencia por Perforadora.**

Type of Drill	\$/Drilling Hour (Minus Bits)	% Total Time Drilling (Mechanical Availability × Operating Per Cent)
<b>TACONITE</b>		
60 R	28.00	60
50 R	32.00	55
40 R	34.00	50
<b>COPPER</b>		
60 R	16.00	75
50 R	16.00	75
40 R	14.50	75

*Fuente: Ph.D Alan Bauer*

La **Tabla 1**, muestra los costos de perforación obtenidos de Operación y Mantenimiento (Sin incluir el costo de brocas) para tres tipos de perforadoras Bucyrus Erie (40 R, 50 R y 60 R), así como también su porcentaje de Eficiencia de éstos equipos para mineral de Hierro y Cobre.

El autor, además, menciona que en las formaciones de alta resistencia (Taconita, Cuarcita) el costo de la broca representa el 45% del costo total de perforación y en las formaciones de media a baja resistencia representa el 30%.

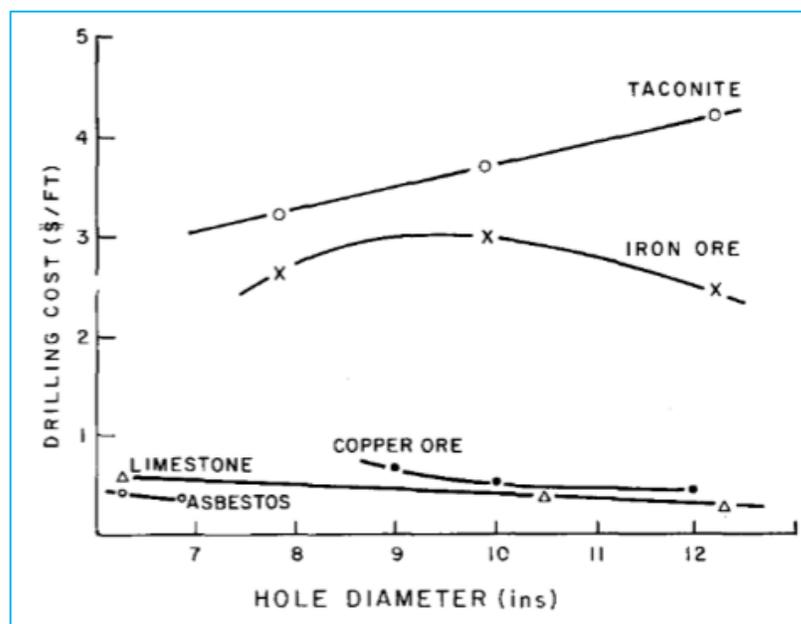


**Figura 3.- Vida de la Broca (Insertos de Carburo de Tungsteno) Respecto al Peso sobre la Broca.**

**Fuente: Ph.D Alan Bauer**

La **Figura 3**, relaciona la vida de las brocas con insertos de carburo de tungsteno respecto al peso sobre la broca aplicado a una formación de roca con alta resistencia compresiva uniaxial (Taconita, Cuarcita). La perforadora utilizada fue una Bucyrus Erie 60R, siendo el tiempo de muestreo de 2 años con brocas de diámetro 9 7/8".

La tendencia mostrada indica que, mientras mayor presión ejerce la columna de perforación sobre la broca, su vida de ésta broca será cada vez menor.

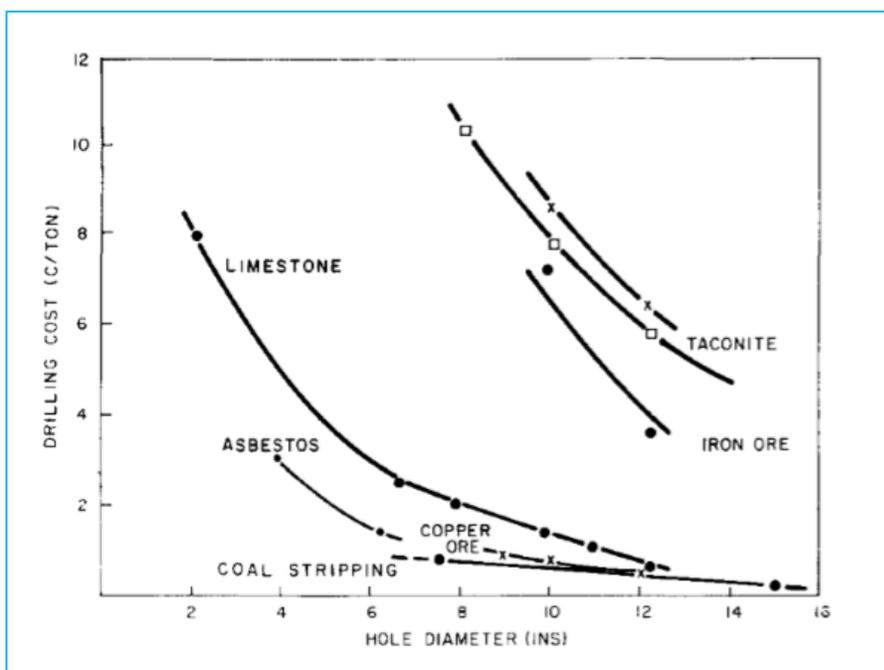


**Figura 4.- Costos de Perforación según el Tipo de Material y el Diámetro de Perforación Utilizado.**  
**Fuente: Ph.D Alan Bauer.**

En la **Figura 4**, muestra claramente la diferencia de tendencias por tipo de material, observando que la Taconita, roca intacta con mayor resistencia, tiene una tendencia creciente en costo respecto al diámetro del taladro, a diferencia con las demás que son decrecientes.

Esto explica que, se debe aplicar a éste tipo de rocas intactas de alta resistencia un *pulldown* superior a otras rocas, aproximadamente de 1000 lbs/pulg<sup>2</sup>, que para un diámetro de 12 ¼" se necesitaría un peso de 150,000 Libras, multiplicando considerablemente el ratio de consumo de brocas debido al mayor desgaste y disminuyendo el rango de perforación sustancialmente.

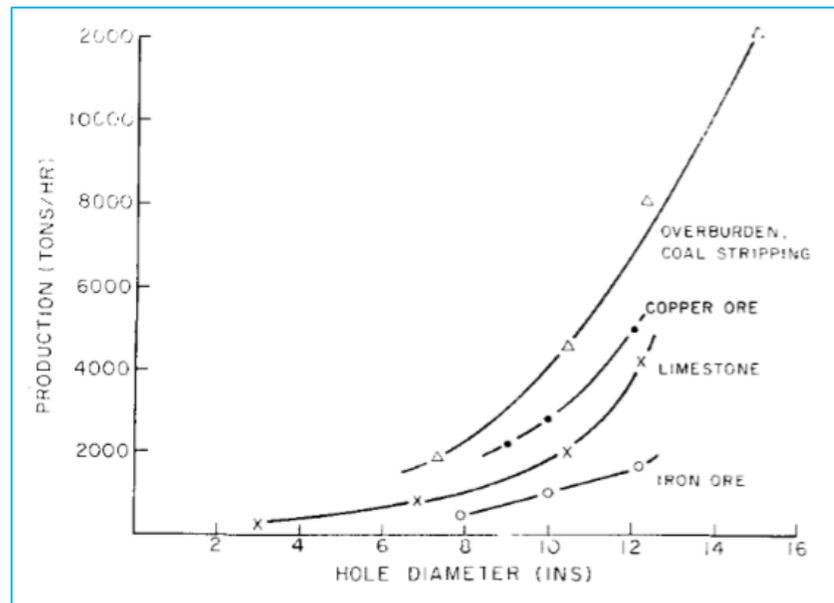
Esto provoca el aumento del costo de perforación, aunque depende mucho del tipo de broca que se utilice (Carburo de tungsteno o acero), la habilidad del operador, la eficiencia de la perforadora, etc.



**Figura 5.-** Costo de Perforación por Tonelada según el Tipo de Material y el Diámetro del Taladro Perforado.

**Fuente:** Ph.D Alan Bauer

Comparando la **Figura 5** con la **Figura 4**, se puede observar que el efecto del diámetro del taladro es mucho más impactante sobre el costo de perforación por tonelada (**Figura 5**) que por longitud perforada (**Figura 4**), ya que la malla de perforación (Burden x Espaciamiento) es mayor cuando se perfora taladros de mayor diámetro, siendo ésta la causa del menor costo de perforación por tonelada.



**Figura 6.- Producción por Hora de Material Perforado según Diámetro del Taladro.**

**Fuente: Ph.D Alan Bauer**

La **Figura 6**, muestra el incremento de la producción en toneladas por hora dependiendo del material a perforar (Rango de penetración, en m/h) y el diámetro del taladro, en pulgadas.

Se observa la tendencia creciente según aumenta el diámetro del taladro, además de mostrar valores de producción más altos para materiales con una menor resistencia.

Estos valores se explican claramente con la variación de los siguientes factores:

- Mayor rango de penetración, Mayor productividad
- Mayor eficiencia de perforadora, Mayor productividad
- Mayores dimensiones de malla de perforación, Mayor productividad

## **1.2. PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

La Matriz de Consistencia la podemos encontrar en el **ANEXO 01**, de la cual se desprende lo siguiente:

### **1.2.1. Problema general**

¿En qué medida el consumo excesivo de brocas tricónicas, bajos rangos de penetración y baja eficiencia del proceso, producen un aumento significativo en los costos de la perforación tricónica de rocas de alta resistencia compresiva?

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Cómo afecta la incorrecta combinación de variables operacionales en la perforación de rocas de alta resistencia compresiva?
2. ¿Cómo afecta en el costo de perforación, utilizar brocas tricónicas incorrectas para rocas de alta resistencia compresiva?
3. ¿Qué ocasiona la baja eficiencia del proceso, en la productividad y costo de perforación?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo general**

Lograr reducir el costo unitario de perforación, mediante el incremento del rango de penetración, con la mejora de la eficiencia del proceso de perforación y la selección de brocas tricónicas de mayor vida útil, en rocas de alta resistencia a la compresión, en mina Marcona.

### **1.3.2.Objetivos específicos**

1. Reducir el costo unitario de perforación, mediante el incremento del rango de penetración, debido a una correcta combinación de variables operacionales y selección de la broca tricónica.
2. Reducir el costo unitario de perforación, mediante la reducción del costo de la broca tricónica, debido a la selección del recurso mediante Costo/Beneficio de la vida útil de la broca y el costo por tipo de fabricante.
3. Reducir el costo unitario de perforación, mediante el incremento de la eficiencia de perforación, debido a la reducción de horas improductivas del proceso, atacando a las actividades contributorias y no contributorias.

## **1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1.Hipótesis general**

Si se incrementa el rango de penetración (m/h) de una perforadora rotativa combinando mejor sus variables operacionales, se selecciona correctamente una broca tricónica para rocas de alta resistencia compresiva y se mejora la gestión de operaciones aumentando la eficiencia del proceso; se logra reducir el costo unitario de perforación en la mina de Marcona.

### **1.4.2.Hipótesis específicas**

1. Si el rango de penetración aumenta, combinando de forma correcta las variables operacionales (*pulldown*, velocidad de rotación, velocidad de barrido); se logra reducir el costo unitario de perforación en la mina de Marcona.

2. Si se selecciona de forma correcta la broca tricónica, por el tipo de roca de alta resistencia compresiva a perforar; se logra reducir el costo unitario de perforación en la mina de Marcona.
3. Si la eficiencia del proceso aumenta, disminuyendo las horas improductivas con una mejor gestión de operaciones; se logra reducir el costo unitario de perforación en la mina de Marcona.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 2.1. PERFORACIÓN

La Perforación es la primera operación unitaria dentro del ciclo de minado. La calidad del taladro perforado, afecta directamente los resultados de la Voladura. Estas dos operaciones mineras unitarias materializan su resultado en la **fragmentación** del macizo rocoso, conocida como Operación Binomial, siendo ésta la variable principal que determina la productividad de las operaciones unitarias posteriores; esto es carguío, acarreo, chancado y molienda.

Como proceso, la perforación consiste en lograr la penetración en el macizo rocoso formando aberturas cilíndricas denominados “taladros” o “*Blastholes*”, en idioma inglés. Estos taladros pueden ser inclinados o verticales, siendo los últimos recomendados para la voladura en minería a tajo abierto.

##### 2.1.1. Métodos de perforación

Existen diversos métodos para penetrar el macizo rocoso, dependiendo del tipo de energía utilizada, sea mecánica, térmica, hidráulica, etc.

Actualmente la Perforación rotativa con broca tricónica es el método de perforación de rocas más utilizado en operaciones mineras a tajo abierto.

A continuación se mencionan y describen algunos de éstos otros métodos de perforación:

- **Jet Piercing (Energía térmica):** Consiste en el calentamiento continuo de un punto en la roca, provocando una inducción de esfuerzos térmicos con el fin de generar una alta diferencia de temperaturas logrando fracturar el macizo rocoso.
- **Hydrofracturing (Energía hidráulica):** Perforación de roca mediante la proyección de agua a alta presión (150 - 300 MPa) y alta velocidad (300 – 500 m/s). Actualmente en minería se utilizan en el corte de rocas ornamentales y en la perforación de taladros para bulonaje en diámetros de 24 y 32 mm.
- **Radialfrac (Energía hidráulica):** Método de penetración de formaciones rocosas suaves a medias, utilizada en la industria Petrolera. Consiste en la expansión de gas CO<sub>2</sub> por combustión de un propelente en una herramienta denominada “Radialfrac”; provocando así en el fondo del pozo petrolero la penetración de la roca entre 2 a 15 metros.
- **Electrofrac (Energía eléctrica):** Consiste en que la corriente eléctrica es convertida en una fuerza electro-termal, electromagnética o electromecánica, las cuales fracturan el macizo rocoso por la elevación de la temperatura de un volumen limitado del mismo.
- **Perforación percutiva (Energía mecánica):** Perforación mediante uso de impactos o soplos mediante la energía neumática o hidráulica que acciona un pistón dentro de un cilindro (Partes esenciales de la perforadora a percusión). Es utilizada mayormente en minería subterránea por equipos manuales como *Jackleg*, *Top Hammer* o *Jack Hammer*; y equipos mecanizados como los Jumbo, Simbas, etc.

## **2.2. PERFORACIÓN ROTATIVA CON BROCA TRICÓNICA**

Método de perforación que emplea una broca tricónica para triturar la roca que entre en contacto con sus insertos afilados. Es uno de los métodos más efectivos y comúnmente usados en la Construcción, Minería e Industria petrolera por su capacidad de triturar las más desafiantes formaciones rocosas de alta dureza.

La plataforma de perforación rotativa consiste de un sistema de izaje, rotación y circulación las cuales realizan tareas cruciales para una eficiente perforación de un taladro.

Éste método de perforación de roca se realiza mediante energía mecánica que consiste en ejercer una gran fuerza de avance (*Pulldown*) y un sistema rotacional con una velocidad adecuada en RPM (Revoluciones por minuto) sobre la broca tricónica. Además de esto se toma en cuenta el caudal de flujo de aire impulsado por la compresora con el fin de enfriar los cojinetes de la broca y realizar el barrido de los detritos o roca triturada, hacia superficie, ver los **ANEXOS 06 y 07**.

### **2.2.1.Historia**

La perforación rotativa se ha usado cerca a los 3000 años a.C. en China y luego en Egipto. El concepto de perforación rotativa ha evolucionado y crecido con el tiempo. Leonardo da Vinci creó un diseño para una perforadora rotativa cerca al año 1500.

La primera invención de una perforadora rotativa fue patentada en el año 1845 por el inglés Robert Beart.

En minería, hasta el año 1949, los taladros de voladura (Blastholes) eran perforados con equipos roto-percutivos y sólo en el caso de rocas muy suaves era aplicable la perforación rotativa con brocas de corte o trépanos. Luego, tras la explotación de grandes minas de carbón a cielo abierto en Estados Unidos, con recubrimientos que superaban los 40 metros, y además la aparición en el mercado del agente de voladura ANFO, el cual era barato y eficiente, impulsaron a los fabricantes de perforadoras a diseñar equipos de mayor capacidad que alcancen altas velocidades de penetración, ver **Tabla 2**.

**Tabla 2.- Línea de Tiempo en la Invención de la Tecnología de Perforación Rotativa con Broca Tricónica**

Inventor	David y Joseph Ruffner	L. Disbrow	William Morris	Robert Beart	George Bissell y Edwin L. Drake	John G. Leyner	Howard Hughes Sr., Walter Sharp	Lee C. Moore	Howard Hughes Jr.
Invención	Cable-tool Drilling	First four-legged derrick	Jars (Barrenos)	Rotary Drill	Primera plataforma petrolera	water-cooled drill	Two-Cone Drill Bit	Barrenos de acero	Tricone drilling bit
Año	1806	1825	1841	1845	1859	1897	1909	1912	1933
Descripción	La herramienta de cable fue el primer método utilizado para perforar un pozo, particularmente para pozos de petróleo o gas poco profundos. El cable se refiere a la cuerda de cáñamo manila utilizada para suspender las varillas de madera y las herramientas de perforación en las primeras operaciones. La línea de manila y las varillas de madera fueron eventualmente reemplazadas por una cuerda de acero de varias hebras, a menudo llamada cuerda de alambre o cable.	La primera torre de cuatro patas fue dada, originalmente en 1825 y luego elaborada en 1830. La estructura consistía en patas de madera cuadrada. Los aros insertaron en las patas de madera con llaves para que la estructura se pudiera desmontar.	El éxito mecánico de la perforación de herramientas de cable ha dependido en gran medida de un dispositivo llamado frascos, invención en el condado de Kanawha (ahora en Virginia Occidental). Morris patentó esta herramienta única en 1841 para la perforación de pozos artesianos. Más tarde, utilizando frascos, el sistema de herramientas de cable pudo satisfacer de manera eficiente las demandas de perforación de pozos de petróleo.	Los primeros métodos de perforación rotatoria consistían en unir un dispositivo de perforación a una mula que caminará en círculos para lograr la rotación necesaria para la perforación.	Primer uso exitoso de una plataforma de perforación en un pozo comercial perforado especialmente para producir petróleo en Pensilvania. Perforaron a 69 pies.	Inventó un taladro refrigerado por agua que ayudó a amortiguar el polvo levantado en la perforación.	Se convirtió en la herramienta crucial para perforar yacimientos petroleros, primero en la costa del golfo de EEUU y luego alrededor del mundo. Hoy las brocas de cono en uso en todo el mundo aún confían en los principios de diseño introducidos por la broca de dos conos de Hughes.	Patentó un sistema que aseguró los soportes de las tuberías de acero para construir una torre de acero. Hasta ese momento, las torres de perforación de petróleo eran comúnmente plataformas de herramientas de cable de madera.	Muchos fabricantes de brocas estaban experimentando con cuatro conos, excepto Hughes Tool. Su nueva broca vino con tres conos montados centralmente con dientes que se entrelazaron y se limpiaron por sí mismos. La broca de tricono pronto ganó aceptación en el oeste de Texas, y en 1933 Hughes Tool recibió una patente de EE. UU.

**Fuente: National Driller Magazine, U.S.A.**

### 2.2.2.Descripción General de Perforadora Rotativa

Las perforadoras rotativas están integradas por diversos componentes, tal como se aprecia en el **ANEXO 03**, que permite generar una alta eficiencia y rendimiento en la penetración de la roca, las cuales son:

- ***Cabezal deslizante y motor de rotación***
- ***Mástil y columna de barrenos de perforación***
  - Cadena de elevación y empuje
  - Motor de elevación y empuje
  - Reductor
- ***Cabina del operador***
  - Cuadro de mandos
- ***Sala de máquinas***
  - Unidad de Potencia
  - Compresores de aire
  - Filtros de aire
  - Transformador
  - Bombas
  - Tableros eléctricos
- ***Chasis y plataforma del equipo***
  - Escalera de acceso
  - Bastidor Principal
- ***Patas hidráulicas de nivelación y apoyo***

### 2.2.3. Columna de Barrenos de Perforadora Rotativa

Para realizar un trabajo de perforación específico pueden elegirse diversas combinaciones de accesorios. Los factores que hay que considerar en la selección de sus componentes son el diámetro, la resistencia del acero a utilizar, el tipo de conexiones, etc.

Los aceros empleados en la fabricación de estas herramientas deben de ser resistentes a la fatiga, a la flexión, a los impactos y al desgaste. En la **Figura 7**, se puede ver la descripción de cada uno de ellos.

- **Shock Absorber (Amortiguador).**- Es el encargado de disminuir vibraciones provocadas por la perforación hacia elementos vitales de la máquina y el operador. Su uso nos da ciertas ventajas en la operación:
  - Protege el cabezal y motores de rotación y empuje
  - Reduce el daño a los hilos o conexiones
  - Ayuda al contacto continuo de la broca con la roca.
- **Top Sub (Adaptador Superior).**- Adaptador encargado de conectar el Shock Absorber con la barra de perforación. Es fabricado de acero con aleación de alta calidad, con tratamiento térmico.
- **Barra de perforación.**- Es una conexión mecánica entre la perforadora y la broca tricónica, la cual tiene las siguientes funciones:
  - Transmitir el peso a la broca
  - Transmitir rotación desde el cabezal rotatorio a la broca
  - Transmitir el fluido y/o aire comprimido hacia la broca
- **Deck Bushing (Anillo Centralizador).**- Este elemento proporciona la estabilidad a la columna de perforación y la verticalidad.

- **Bit Sub (Adaptador de Tricono).**- Adaptador encargado de conectar el *Deck Bushing* con la Broca tricónica. Para protección contra la abrasión y erosión, se aplica un recubrimiento duro (*Hard Facing*).
- **Broca Tricónica.**- Es el componente final de la columna de perforación, el cual se usa para triturar la roca.

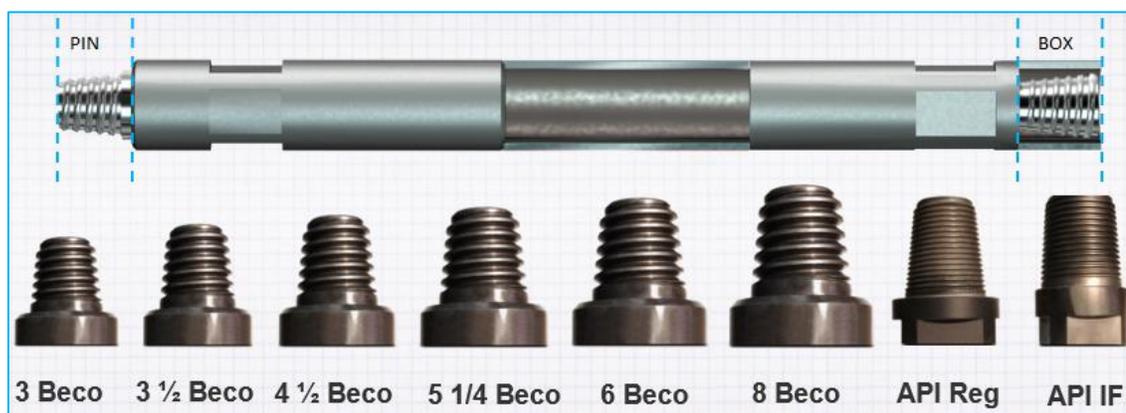


**Figura 7.- Columna de Barrenos de Perforación Rotativa.**  
Fuente: SANDVIK

Los barrenos mencionados, pertenecientes a la columna de perforación, la aleación que los compone pueden ser de distintas calidades; tales como:

- **SAE 4145.-** Acero con tratamiento térmico con aleación de cromo-molibdeno, de alta resistencia a la tracción, al desgaste y al impacto. (**Resistencia tracción = 930-1013 N/mm<sup>2</sup>, Límite de fluencia = 680 MPa**).
- **SAE 4130 o 4140.-** Acero con buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad térmica hasta 600°C Alta resistencia a la torsión, al desgaste y a la tracción. (**Resistencia tracción = 755-810 N/mm<sup>2</sup>, Límite de fluencia = 414 MPa**).
- **ST-52.-** Acero de uso general, de mediana resistencia a la ruptura y abrasión. Tiene una buena soldabilidad y maleabilidad. (**Resistencia tracción = 510-628 N/mm<sup>2</sup>, Límite de fluencia = 460 MPa**).

Además de la calidad de aleación que los compone, se tienen diferentes conexiones rotativas entre los barrenos, los cuales se muestran en la **Figura 8**.



**Figura 8.- Conexiones BECO y API para Diferentes Diámetros de Barrenos de Perforación.**

**Fuente: SANDVIK**

La función principal de estos hilos o roscas, es transmitir la fuerza opuesta para mantener el sello entre dos clases de acero, en la columna de perforación; además de esto, es el elemento estructural que mantiene la rigidez de la columna.

Estos hilos o roscas deben tener ciertas características, el cual permitan un máximo de resistencia a la tensión, capacidad de sello y rigidez en cada conexión.

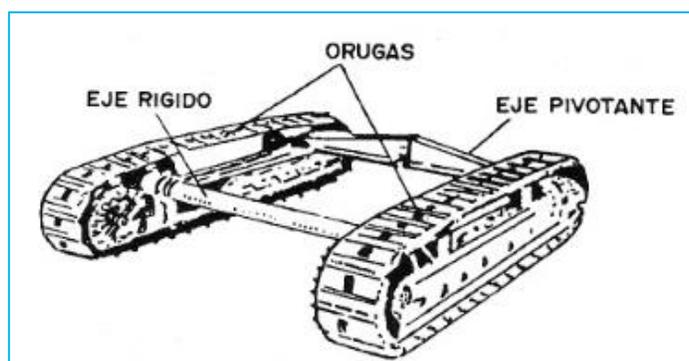
#### 2.2.4. Mecanismos Principales de Perforadora Rotativa

Las perforadoras rotativas están constituidas esencialmente por una fuente de energía y una batería de barrenos y accesorios conectados en serie en el mástil o torre de perforación que transmiten el peso, la rotación y el aire de barrido a la broca tricónica.

Además de éstos, existe un conjunto de accionamientos que están dentro del sistema de perforación, mostrados en el **ANEXO 02**, tales como:

- **Montaje y Sistemas de Propulsión.-** Existen dos sistemas de montaje para las perforadoras rotativas: sobre orugas o sobre neumáticos, siendo los factores de selección las condiciones del terreno y el grado de movilidad requerido.

El montaje sobre orugas es seleccionado para superficies desniveladas, con fuertes pendientes y/o baja capacidad portante; siendo el más indicado por su gran estabilidad, maniobrabilidad y flotabilidad debido a los ejes, ver **Figura 9**, que les permite oscilar y mantenerse en contacto con el terreno. Pueden ser las orugas de tejas tipo tractor o planas, donde su principal inconveniente de este tipo de montaje es su baja velocidad de propulsión que varía entre 2 a 3 Km/h.



**Figura 9.- Ejes del Tipo de Montaje Sobre Orugas.**

**Fuente: Instituto Tecnológico Geo-minero de España.**

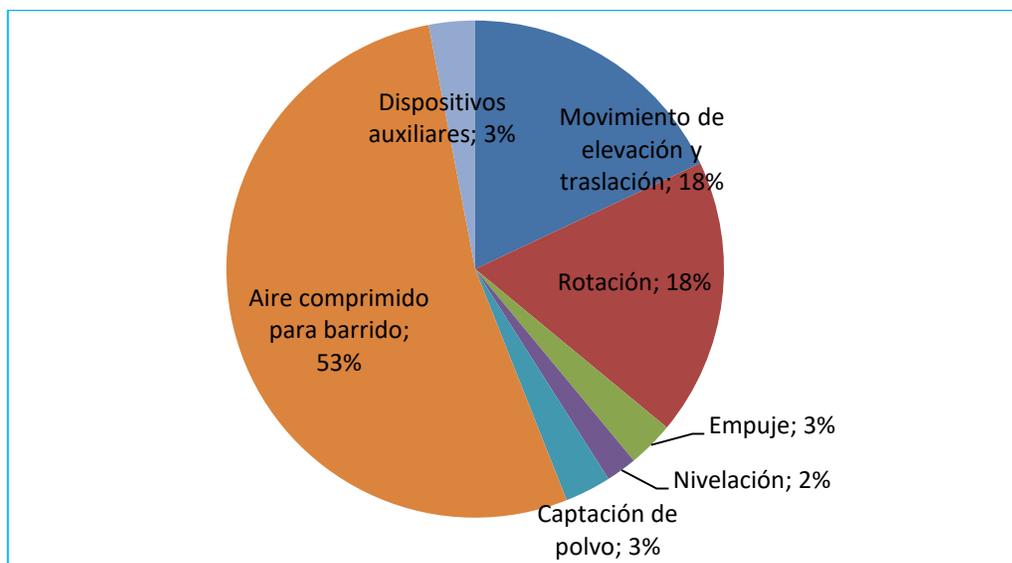
El montaje sobre camión, uso de neumáticos, tiene como ventaja su mayor velocidad de propulsión que es casi 10 veces más que la del montaje sobre orugas, pero en la cual no es seleccionado para superficies con fuertes pendientes, desniveladas y con baja capacidad portante debido a su menor tracción y altas presiones ejercidas por los neumáticos sobre el terreno.

- **Unidad de Potencia.-** Las fuentes primarias de energía pueden ser: motores diésel o eléctricos, y su aplicación se realiza mediante mecanismos de transmisión mecánicos e hidráulicos.

Generalmente las perforadoras que necesitan mayor potencia para diámetros mayores a 9" o 230mm de diámetro de perforación, utilizan fuente energética de media tensión y corriente alterna (380 a 500 Voltios), mediante cables de cuatro conductores con recubrimiento de goma.

Para Perforadoras de menor potencia para diámetros menores a 9" o 230mm de diámetro de perforación, que suelen estar montadas sobre camión, se utiliza con motores Diésel. En éstos equipos se puede realizar la perforación con el mismo motor del camión o con un motor independiente, siendo recomendable lo segundo por su mayor eficiencia y debido que se necesitan motores de diferentes características (Potencia, RPM, etc.)

Un reparto medio de la potencia instalada en las perforadoras rotativas para las diferentes operaciones y mecanismos, se puede ver en la **Figura 10**:



**Figura 10.- Distribución Media de la Potencia Instalada en una Perforadora Rotativa.**

**Fuente: Instituto Tecnológico Geo-minero de España.**

- **Mecanismo de Rotación.-** Existen dos sistemas de rotación generales, el directo e indirecto, utilizados en la industria minera y petrolera respectivamente.

El sistema de rotación indirecto o mecánicos son el de la mesa de rotación y el denominado de Falsa Barra Kelly.

El sistema de rotación directo consta generalmente de un motor eléctrico de corriente continua, para perforadoras rotativas eléctricas de mayor potencia o de mayores diámetros de perforación, y de un motor hidráulico, para perforadoras diésel de menor potencia. Este sistema de rotación está en contacto directo con la columna o sarta de perforación, ejerciendo el par de rotación cuya velocidad varía de 0 a 150 RPM.

El motor eléctrico e hidráulico se coloca generalmente sobre un bastidor, formando el cabezal que se desliza a lo largo del mástil de la perforadora, ver **ANEXO 04**.
- **Mecanismo de Empuje y Elevación.-** Debido a que el peso de la columna de perforación no es suficiente para vencer la resistencia de la roca, es necesario tener un sistema el cual canalice el peso de la perforadora a una gran fuerza de empuje sobre la

broca, con el fin de obtener una alta velocidad de penetración. Este sistema consta principalmente de un motor hidráulico y básicamente cuatro mecanismos de empuje de la columna de perforación:

- Sistema cremallera y piñón directo
- Sistema cadena directa
- Sistema cremallera y piñón con cadena
- Sistema por cilindro hidráulico

Esta fuerza de empuje en las perforadoras rotativas aproximadamente es el 50% del peso bruto del equipo.

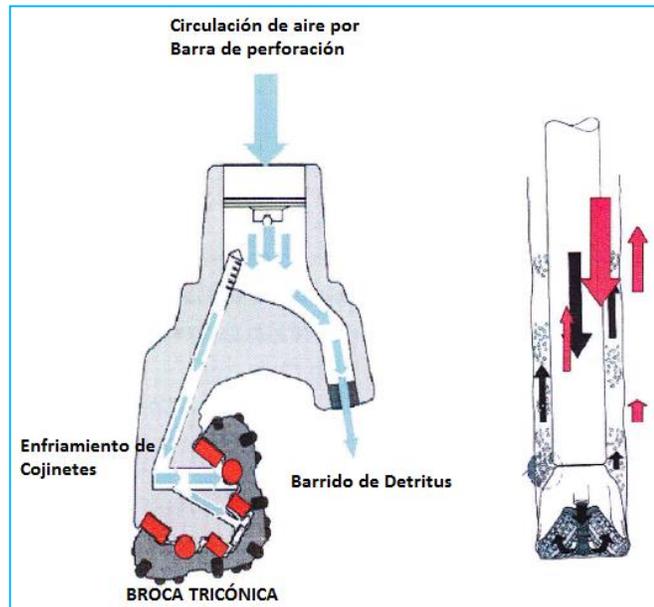
Estos mecanismos de empuje permiten, también, izar la columna de perforación, en el rango de 18 a 21 metros por minuto, no recomendándose magnitudes mayores debido a que se pueden ocasionar fallas mecánicas de los componentes o estructurales en el mástil, que se muestran en el **ANEXO 05**.

- **Sistema de evacuación de los detritus.**- El barrido de detritus de la perforación rotativa se realiza con aire comprimido, para ello se utilizan uno o dos compresores ubicados en la sala de máquinas de la perforadora.

La línea de aire comprimido comienza desde el compresor mediante una tubería conectada hacia el mástil, luego por una manguera flexible circula el aire hasta el cabezal de rotación, en donde va conectado directamente las barras de perforación. El aire comprimido circula por el interior de la columna o sarta de perforación hacia la broca, ver **Figura 11**.

Las funciones del aire comprimido son las siguientes:

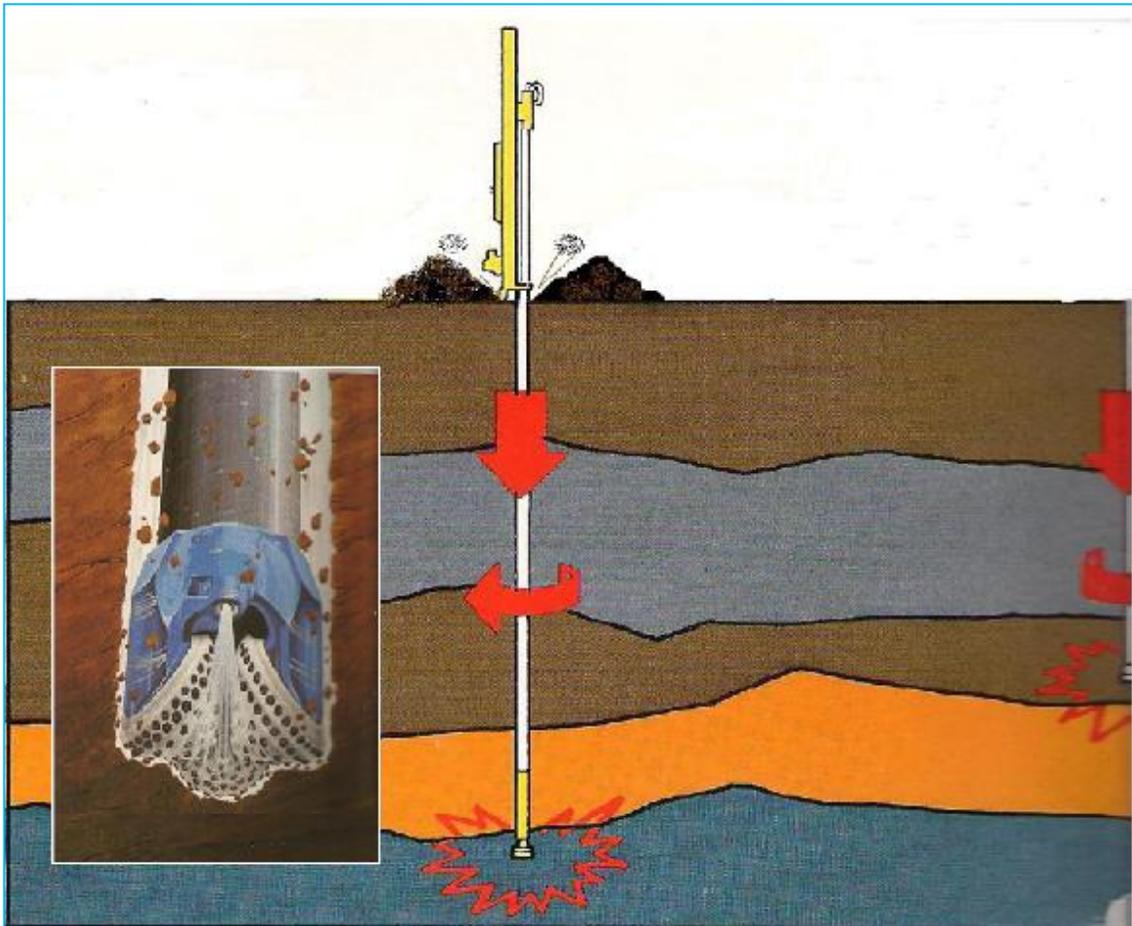
- Enfriar y lubricar los cojinetes de la broca tricónica.
- Limpiar el fondo del taladro.
- Evacuar los detritus con una velocidad ascensional adecuada.



**Figura 11.- Esquema de Circulación de Aire Comprimido en Broca Tricónica.**

**Fuente: Atlas Copco**

Una variable resaltante en éste proceso, es la velocidad de barrido o llamada también en perforación rotativa, velocidad ascensional. Si la velocidad es menor a la adecuada, los detritus no logran ser evacuados del taladro, generando un consumo innecesario de energía, bajas velocidades de penetración, desgaste prematuro de brocas y en el peor de los casos atasco de la columna de perforación. Por otro lado, si la velocidad es mayor a la adecuada se genera un desgaste de las paredes internas de los barrenos, ver **Figura 12.**



**Figura 12.-** Combinación de los Mecanismos de Fuerza de Empuje (*Pulldown*), Rotación (*RPM*) y Evacuación de Detritus para Perforación Rotativa.

**Fuente:** Ph.D Carlos Agreda Turriate, Curso Voladura de Rocas – UNI

### 2.2.5. Factores que Influyen en la Perforación Rotativa

Dentro del proceso de perforación, tenemos muchos factores operacionales los cuales influyen en la producción representada en metros perforados.

- **Perforadora rotativa.-**
  - Fuerza de empuje (*Pulldown*)
  - Rotación
  - Velocidad de propulsión.

- **Barrenos de perforación.-**
  - Espesor
  - Longitud
  - Resistencia a la abrasividad.
- **Brocas tricónicas.-**
  - Tipo de insertos
  - Excentricidad
  - Angulo del eje y del cono.
- **Circulación de fluido**
  - Evacuación de detritus (Presión, Velocidad de barrido)
  - Caudal de compresora (CFM).
- **Dimensiones del taladro**
  - Diámetro
  - Inclinación y altura.
- **Tipo de roca (Variable aleatoria)**
  - Resistencia compresiva uniaxial
  - Discontinuidades
  - Humedad, Densidad, etc.

Todas éstas variables, las definimos de acuerdo al tipo de roca a perforar, siendo el tipo de roca una variable aleatoria que depende de la Geología del yacimiento.

#### **2.2.6.Criterios de Evaluación de Rendimiento**

Para la evaluación del rendimiento de un sistema de perforación y comparar que equipo de perforación es el más adecuado para condiciones específicas, se tienen varios criterios en cuenta; siendo éstos los mencionados a continuación:

- **Energía:** La energía del equipo de perforación es un criterio importante, debido a que cada tipo de roca necesita ejercer presión sobre la broca o *Pulldown* en psi, fuerza de rotación en RPM y un caudal de aire necesario para el barrido en CFM. Todos estos factores generan una cantidad de energía por volumen de roca triturada.
- **Rango de penetración:** Se define como la cantidad de longitud perforada en metros o pies por unidad de tiempo en hora o minuto. Es un parámetro importante en el rendimiento, el cual define directamente la productividad de perforación.
- **Vida útil de la broca:** Es el desgaste de los insertos, debido al rozamiento entre la broca y el macizo rocoso. Este desgaste es directamente proporcional con la abrasividad de la roca y variables de operación aplicadas.
- **Costos:** Este criterio engloba los tres criterios mencionados anteriormente, debido que si se tiene un mayor rango de penetración, una mayor vida útil de los barrenos de perforación y un menor consumo de energía específica, se tendrá una mayor Productividad en t/h y por consiguiente un menor costo total de perforación o *TDC* por sus iniciales en inglés.

El costo total de perforación para evaluación de rendimientos, se calcula de la siguiente manera:

$$TDC = \frac{O \& O \text{ Cost}}{Eff \times PR} + \frac{COB}{LOB}$$

Donde:

- TDC** : Costo Total de Perforación (\$/m)
- O & O Cost** : Costo de Operación y Propiedad (\$/h)
- Eff** : Eficiencia de Perforadora (%)
- PR** : Rango de Penetración (m/h)
- COB** : Costo de Broca (\$)
- LOB** : Vida útil de la Broca (m.)

### 2.2.7. Rango de Penetración (*Penetration Rate* – PR)

El Rango de Penetración, conocido en la industria de perforación como “PR” por sus siglas en inglés “*Penetration Rate*”, es la velocidad en la que una broca tritura la roca que se encuentra en contacto con ella para profundizar un taladro (*Blasthole*).

El valor del Rango de Penetración, depende de las siguientes variables operativas:

- **Variables Mecánicas**
  - Tipo de Broca
  - *Pulldown* (Empuje, Diámetro de taladro)
  - Velocidad de rotación (RPM).
- **Variables Hidráulicas**
  - Presión de fluido de perforación (PSI)
  - Velocidad de barrido (FPM, CFM), ver **Figura 13 y 14**.
- **Variables Geológicas**
  - Resistencia compresiva de la roca (UCS)
  - Presencia de discontinuidades (Fallas, Fracturas, etc.)
  - Presencia de material aluvial, etc.

Dentro de las variables geológicas, hay una variedad de factores que influyen en los rendimientos, tal como la presencia de material aluvial. Este material, si bien, se perfora con muchísima facilidad por ser un material suelto, dificulta en el armado del taladro teniendo que utilizarse aditivos tales como el **POLYLIQUID**.

Se tienen modelos matemáticos que relacionan la velocidad de perforación con las variables mecánicas y la resistencia compresiva de la roca; una de las más utilizadas en minería tajo abierto (Perforación rotativa) es la del Ph.D Alan Bauer:

$$PR = (61 - 28 \times \text{Log UCS}) \cdot \left(\frac{W}{\Phi}\right) \cdot \left(\frac{RPM}{300}\right)$$

Donde:

- PR** : Rango de Penetración (pies/h)  
**UCS** : Resistencia compresiva uniaxial (1000 de PSI)  
**W** : Fuerza de Empuje (1000 de Libras)  
 $\Phi$  : Diámetro del taladro (Pulgadas)  
**RPM** : Velocidad de rotación (RPM)

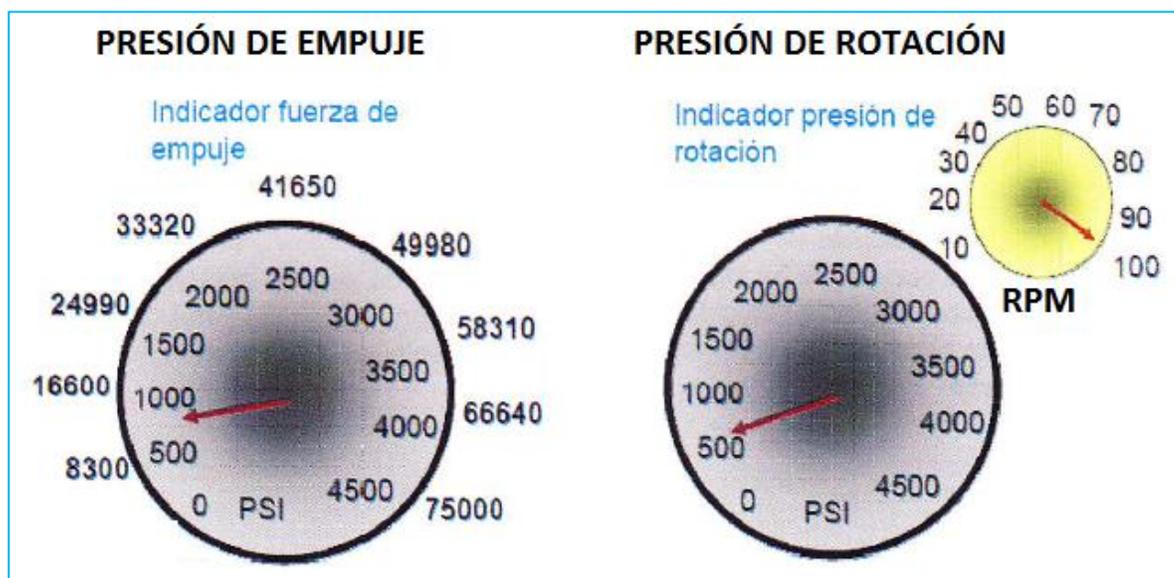


Figura 13.- Manómetros de Pulldown y RPM en Unidad de Presión PSI, en una Perforadora Rotativa.

Fuente: SANDVIK

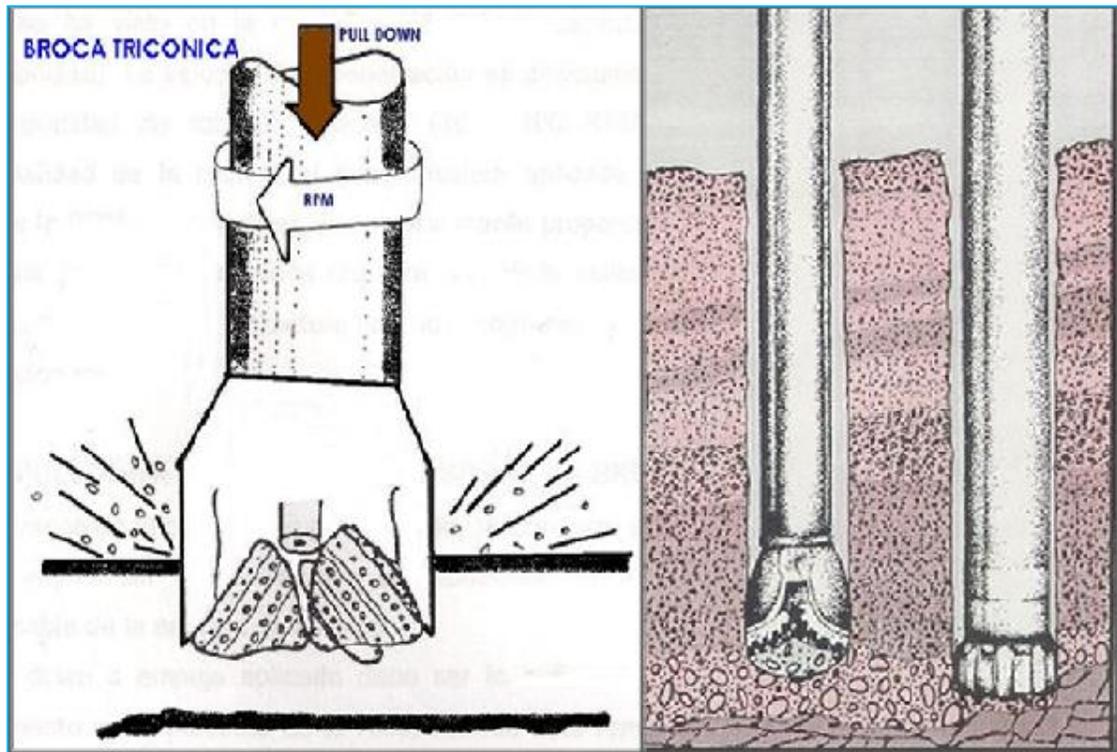


Figura 14.- Variables Operacionales de Perforación Rotativa; Pulldown, RPM y Velocidad de Barrido.  
Fuente: PhD. Carlos Agreda – Rotary Drill (Intercade).

### 2.2.8. Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS)

Esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse.

La resistencia a la compresión uniaxial, se mide en una prensa hidráulica que registra el esfuerzo compresor aplicado sobre una probeta de material en una dirección del espacio, y la deformación lineal inducida en esa misma dirección.

Respecto a la clasificación de la resistencia compresiva uniaxial de rocas, se utiliza la **Tabla 3**, resultando que se clasifica como rocas de alta resistencia compresiva uniaxial dentro

de la litología del yacimiento de Marcona, al mineral **Primario (PO)**, **Cuarcita (QZ)** y **Actinolita (ACT)**.

**Tabla 3.- Clasificación de Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) por Tipo de Roca**

Clase	Descripción	Resistencia a la compresión uniaxial		Tipos de roca
		(PSI)	(MPa)	
A	Resistencia muy alta	> 32.000	≈ 220	Cuarcitas, diabasas. Mayoría de rocas ígneas. Ciertas rocas metamórficas. Areniscas frágilmente cementadas. Lutitas resistentes. Mayoría de las calizas. Ciertas dolomitas.
B	Resistencia alta	16.000 – 32.000	≈110 a ≈220	
C	Resistencia media	8.000 – 16.000	≈55 a ≈110	Algunas lutitas. Areniscas y calizas porosas. Esquistos y rocas metamórficas.
D	Resistencia baja	4.000 – 8.000	≈28 a ≈55	Rocas porosas de baja densidad. Areniscas deleznable. Tufas y lutitas arcillosas. Rocas meteorizadas y químicamente alteradas de cualquier litología.
E	Resistencia muy baja	< 4.000	< 28	

**Fuente:** “Strength compressive”, Deere 1968

### 2.2.9. Brocas Tricónicas

Es el componente aplicador de la energía durante la perforación rotativa. Su función es triturar la roca.

Es una de las partes fundamentales en el sistema de perforación rotativa; esto es, debido a que los insertos que contienen estas brocas, deben ser adecuadas al tipo de macizo rocoso que se desea penetrar.

El efecto de penetración de un tricono, se obtiene por la aplicación combinada de dos acciones: **Indentación y Corte**.

La **Indentación**, implica que los dientes o insertos de las brocas, penetran o se entierran en la roca por la aplicación de una gran fuerza de empuje. Esta acción es la que produce la trituración de la roca.

El **Corte**, es debido al desplazamiento lateral de los rodillos, consiguiendo una acción de desgarre de la roca.

Algunos aspectos importantes de la broca son el **factor de desgaste**, directamente dependiente de la abrasión de la roca, la cual hace que disminuya progresivamente el diámetro de los insertos y los va limando. El otro aspecto es la **vida útil**, término con el que se conoce a la distancia acumulada perforada en metros o pies antes que se deteriore o se rompa por fatiga.

Si una broca tricónica determinada es utilizada para un tipo de macizo rocoso, el cual no es el adecuado para esta, se tendrán las siguientes deficiencias:

- Menor velocidad o Rango de Penetración (PR)
- Disminución de su vida útil y, por lo tanto, un mayor costo por metro perforado.

#### **2.2.9.1. Partes de las Brocas Tricónicas**

Están formadas por tres conos cortadores que giran sobre su propio eje, dentro de estos se encuentran los dientes o insertos.

Las brocas tricónicas tienen los siguientes componentes principales, ver **Figura 19**.

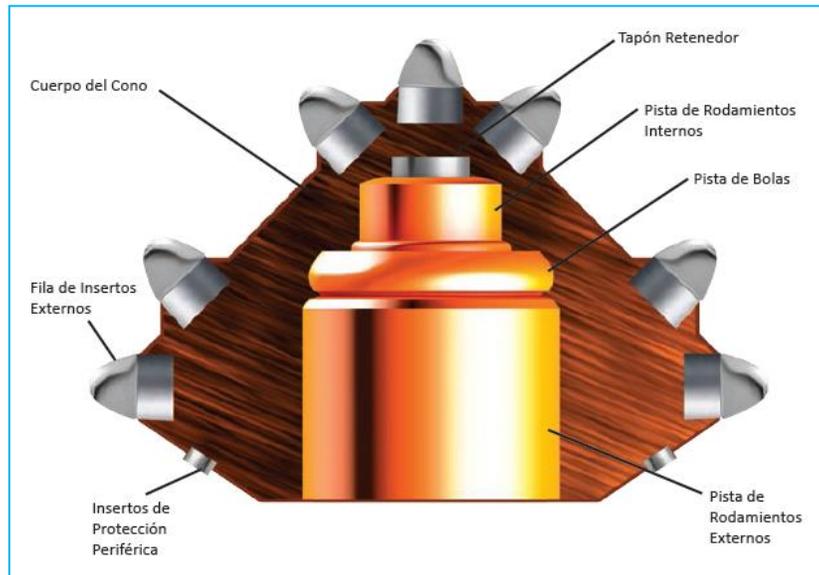
- **Estructura de corte o conos.**- Se emplean dos tipos de estructuras de corte; las de dientes de acero y las de insertos de carburo de tungsteno, mostradas en las **Figuras 15 y 16**.

La estructura de corte está montada sobre los cojinetes, que rotan sobre pernos.

Parámetros de diseño de dientes o insertos:

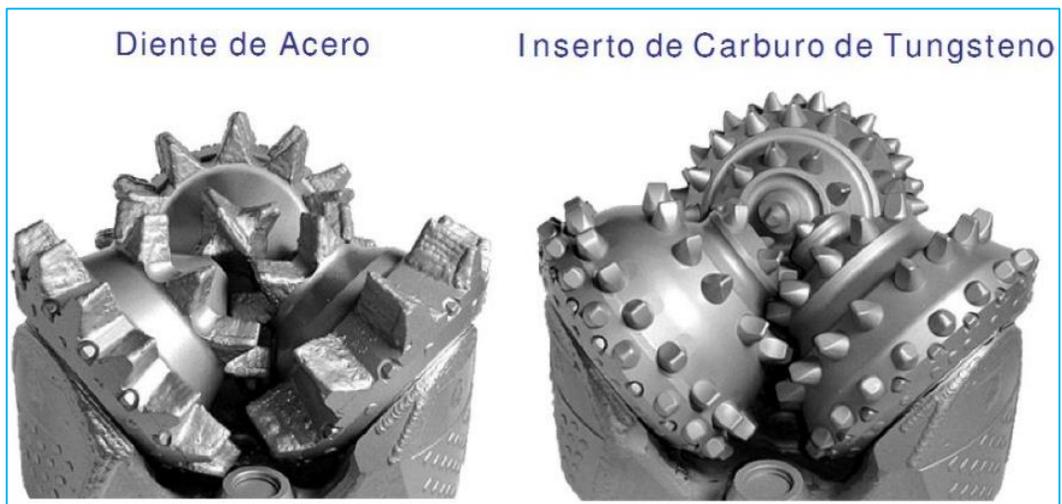
- Perfil interno y externo
- Tamaño
- Proyección
- Longitud de penetración
- Espaciamiento entre insertos

- Grado del acero o carburo de tungsteno.



**Figura 15.- Conos con Insertos de Carburo de Tungsteno.**

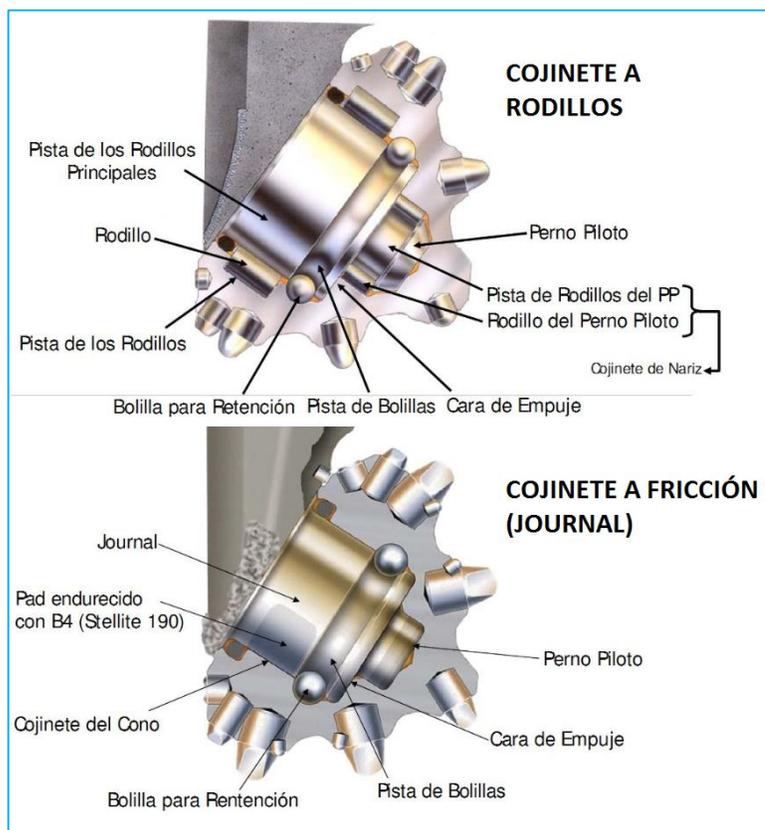
**Fuente: Catálogo, Mammoth Drill Tools Perú.**



**Figura 16.- Estructuras de Corte o Conos con Dientes de Acero o Insertos de CT.**

**Fuente: INSUTEC, Argentina.**

- **Cojinetes.-** Permiten a los conos girar alrededor del cuerpo de la broca. Pueden ser:
  - *Cojinete a rodillos:* Posicionados de tal forma que soporten la carga radial.
  - *Cojinete a fricción (Journal):* Perno sólido unido a la superficie interna del cono que se convierte en el principal elemento del cojinete que soporta la carga radial, ver **Figura 17**.

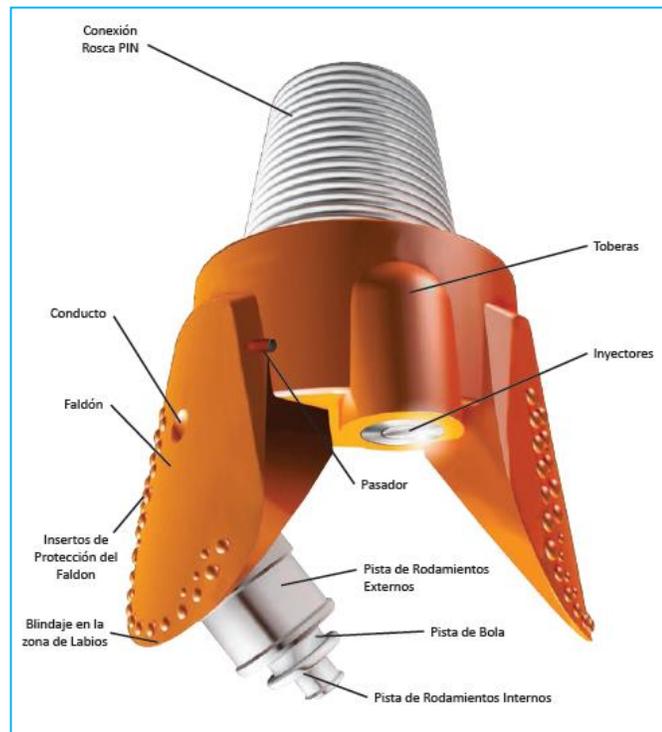


**Figura 17.- Componentes de Cojinetes a Rodillos y a Fricción (Journal) de Brocas Tricónicas.**  
**Fuente: INSUTEC, Argentina.**

- **Cuerpo.-** Su propósito es mantener la unión de sus elementos y de dirigir el fluido de perforación hacia el fondo del taladro, para el barrido de los detritos, y hacia los cojinetes para su enfriamiento. El cuerpo consiste de los siguientes componentes:
  - Conexión o rosca la cual se une al Bit-sub.

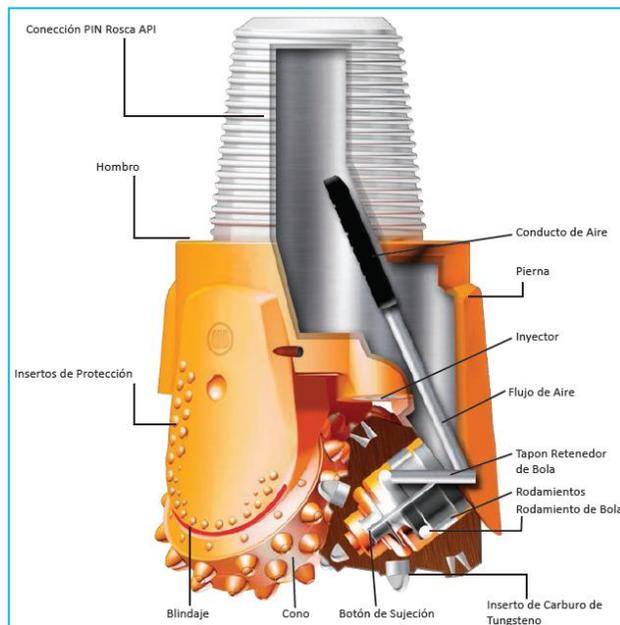
- Tres ejes para los cojinetes en donde van montado los conos.
- Depósitos por donde ingresa el fluido lubricante hacia los cojinetes.
- Orificios por donde sale el fluido de barrido hacia el fondo del taladro, ver

**Figura 18.**



**Figura 18.- Partes del Cuerpo de una Broca Tricónica con Rosca PIN.**

**Fuente: Catálogo, Mammoth Drill Tools Perú.**



**Figura 19.- Partes Principales de una Broca Tricónica con Insertos de Carburo de Tungsteno y Rosca API.**  
**Fuente: Catálogo de Brocas, Mammoth Drill Tools Perú.**

### 2.2.9.2. Tipos de Brocas Tricónicas

Las brocas tricónicas se clasifican en dos tipos, debido a la estructura de corte que los diferencia, tal como se puede ver en la **Tabla 4**:

- **Dientes de Acero (ST).**- Fabricadas a partir de piezas forjadas de aleación de acero con níquel, molibdeno y cromo. Son más económicas, comparadas con las de insertos de carburo de tungsteno; y, están diseñadas para triturar rocas de resistencia suave, media y semi-dura.
- **Insertos de Carburo de Tungsteno (TCI).**- Insertos de carburo de tungsteno introducidos a presión en huecos perforados en los conos. Su vida útil es mayor, debido a que es más resistente al desgaste que el acero, pero su costo es más elevado. Están diseñadas para rocas de resistencia suave, media, dura y muy dura.

**Tabla 4.- Diseño de ST y TCI, según la Resistencia de la Roca a Perforar.**

Triconos con dientes de acero (ST)				
TIPO DE ROCA	DISEÑO DIENTES		ACCIÓN	
	ESPACIO	ALTURA	TRITURACION	CORTE
Blandas				
Medianas				
Duras				

Triconos con insertos de CT (TCI)				
TIPO DE ROCA	DISEÑO INSERTOS		ACCIÓN	
	ESPACIO	RESALTE	TRITURACION	CORTE
Blandas (< 40 MPa)				
Medianas (40 a 90 MPa)				
Semiduras (90 a 170 MPa)				
Duras (170 a 230 MPa)				
Muy duras (> 230 MPa)				

**Fuente: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas.**

### 2.2.9.3. Selección de Brocas Tricónicas

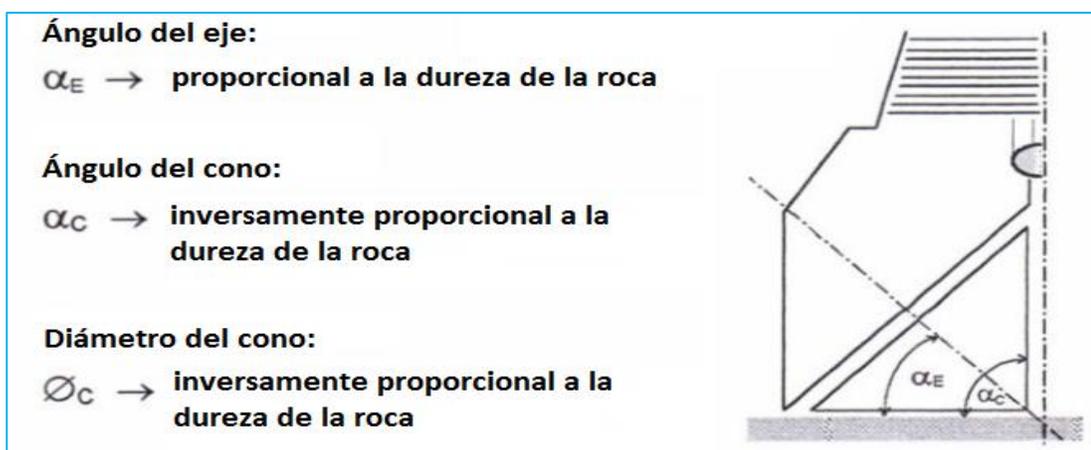
Las brocas de perforación se diseñan tomando en cuenta los siguientes aspectos mecánicos, hidráulicos y de la roca:

- Perfil de la broca
- Geometría de los conos
- Densidad de los dientes o insertos
- Eficiencia del diseño hidráulico
- Interacción del fluido con los dientes o insertos
- Abrasividad y dureza del macizo rocoso.

La buena selección, operación y evaluación de una broca, permite la reducción de costos.

Para la selección de brocas tricónicas, hay algunos criterios geométricos que se tienen en cuenta, dependiendo del tipo de roca a perforar. Estos son:

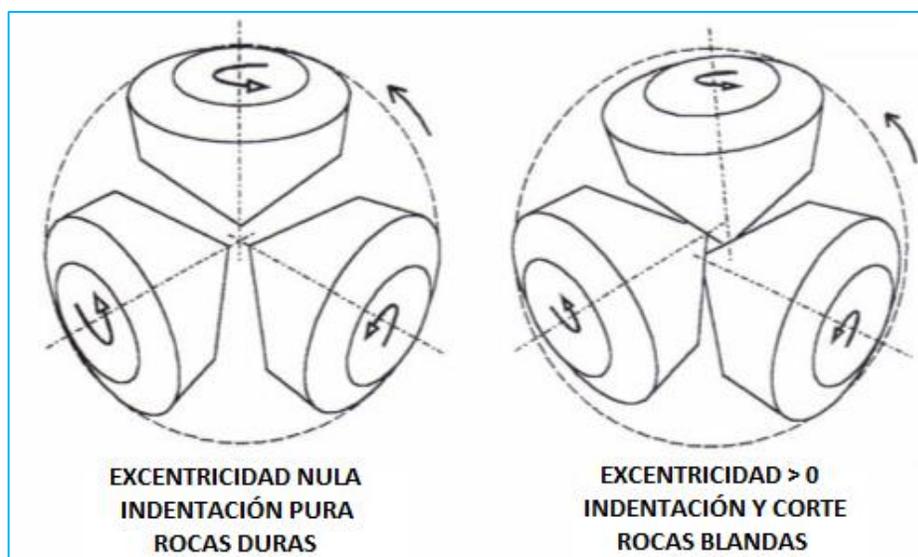
- Geometría de los conos, ver **Figura 20**.



*Figura 20.- Geometría de los Conos de una Broca Tricónica, según la Dureza de la Roca.*

*Fuente: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.*

- Excentricidad de los conos, ver **Figura 21**.



*Figura 21.- Excentricidad de los Conos de una Broca Tricónica, según la Dureza de la Roca.*

*Fuente: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.*

Teniendo en cuenta los factores mencionados para una correcta selección de una broca tricónica, existe un código internacional denominado **IADC** (Asociación Internacional de Contratistas de Perforación), el cual es un sistema estandarizado para clasificar las brocas tricónicas entre los distintos fabricantes. Consta de 3 dígitos según el tipo de formación rocosa, dureza de los dientes o insertos y otras características, ver **Tabla 5**.

Tabla 5.- Codificación Internacional IADC

	1er Dígito		2do Dígito		3er Dígito										
	Sistema de Corte		Dureza		Sistema de rodamiento										
	1	2	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Dientes de Acero	1	Dientes de acero para formación blanda	1	Suave	T	T	P	B	B	C	C	P	O		
			2	Media Suave	O	O	R	A	A	H	H	A	A	T	
			3	Media Dura	B	B	O	L	L	U	U	M	M	R	R
			4	Dura	E	E	T	E	E	M	M	A	A	P	O
	2	Dientes de acero para formación media	1	Suave	R	R	A	C	O	O	C	C	E	S	
			2	Media Suave	A	A	S	S	C	I	S	S	R	R	A
			3	Media Dura	S	S	A	Ó	E	L	L	A	A	F	O
			4	Dura	P	A	I	N	S	E	L	L	S	E	R
	3	Dientes de acero para formación dura	1	Suave	A	R	R	E	A	L	L	S	E	R	
			2	Media Suave	A	R	R	E	A	L	L	S	E	R	
			3	Media Dura	L	O	O	C	A	D	O	L	L	A	C
			4	Dura	D	O	O	A	Y	A	D	A	A	Ó	N
Dientes de Insertos	4	Dientes de inserto para formación muy blanda	1	Suave	O	O	L	A	U	P			D		
			2	Media Suave	Y	Y	B	R	O	R	O	Y	I	E	
			3	Media Dura	B	B	E	U	T	E	P	P	R	E	
			4	Dura	A	A	L	Y	B	R	O	P	R	E	
	5	Dientes de inserto para formación blanda	1	Suave	E	R	O	B	A	C	C	C	C	I	
			2	Media Suave	R	O	S	A	L	B	E	N	I	O	
			3	Media Dura	S	E	S	T	A	E	R	O	A	L	
			4	Dura	E	S	T	A	N	D	A	R	C	A	
	6	Dientes de inserto para formación media	1	Suave	A	R									
			2	Media Suave											
			3	Media Dura											
			4	Dura											
7	Dientes de inserto para formación dura	1	Suave												
		2	Media Suave												
		3	Media dura												
		4	Dura												
8	Dientes de inserto para formación extra dura	1	Suave												
		2	Media Suave												
		3	Media dura												
		4	Dura												

Fuente: Tesis - Diseño del Programa de Brocas, ESPL Facultad Petróleo - ECUADOR

#### 2.2.9.4. Evaluación del Desgaste de Brocas Tricónicas

El rendimiento de las brocas se mide por su vida útil o condición, en la cual su rango de penetración (PR) se mantiene, según el tipo de roca perforada.

Se sabe que mientras el desgaste de la broca aumenta, el rango de penetración disminuye; por ello constantemente se debe medir su desgaste.

El desgaste de las brocas tricónicas se mide por el estado de:

- Dientes o Insertos
- Rodajes o Cojinetes
- Diámetro o Calibre

### 2.3. PRODUCTIVIDAD DE PERFORACIÓN

La perforación como todo proceso, ingresa a un círculo de mejora continua. Un factor muy importante es la productividad, la cual se expresa cuantitativamente en toneladas producidas por hora cronológica (t/h); ingresando a este resultado muchas variables, tales como:

#### 2.3.1. Indicadores de Productividad Operacional (Kpi's)

- **Disponibilidad Física (%):** Indicador que nos da el porcentaje de horas disponibles en la cual el operador de la perforadora puede realizar producción respecto a las horas programadas.

$$\%DF = \frac{H \text{ brutas} + H \text{ parada}}{H \text{ programadas}} = \frac{H \text{ programadas} - H \text{ mantenimiento}}{H \text{ programadas}}$$

- **Uso de la disponibilidad o Utilización (%):** Indicador que nos da el porcentaje de horas utilizadas u horas brutas, motor encendido de operación, respecto a las horas disponibles de la perforadora.

$$\%U = \frac{H \text{ brutas}}{H \text{ brutas} + H \text{ espera}} = \frac{H \text{ brutas}}{H \text{ programadas} - H \text{ mantenimiento}}$$

- **Eficacia (%):** Indicador que nos da el porcentaje de horas netas para producción respecto a las horas utilizadas u horas brutas, motor encendido de la perforadora.

$$\%Eca = \frac{H \text{ netas}}{H \text{ brutas}}$$

- **Eficiencia (%):** Producto de la Disponibilidad Física, Utilización y Eficacia. Indicador que nos da el porcentaje de horas operativas de producción u horas netas de Perforación, respecto a las horas programadas.

$$\%Eff = \frac{H \text{ netas}}{H \text{ programadas}} = \%DF \times \%U \times \%Eca$$

- **Rango de penetración (m/h):** Longitud perforada por unidad de tiempo, resultado de la combinación de las variables operativas de perforación (Presión, Rotación, Barrido) y el tipo de roca perforada (Cuarcita, magnetita, andesita, hematita, etc.)
- **Factor de perforabilidad (t/m):** Factor que relaciona las toneladas a disparar, voladura; por metro lineal perforado; la cual depende de las variables geométricas del taladro como son: *burden*, espaciamiento, altura del taladro, *subdrilling*; tipo de malla de perforación: triangular, rectangular, etc; y densidad de la roca.

Por lo tanto, la Productividad de la perforación se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{Productividad} \left( \frac{t}{h} \right) = \mathbf{PR} \times \mathbf{eff} \times \mathbf{F.P.}$$

Donde:

- P.R.** : Rango de penetración (m/h netas)  
**Eff.** : Eficiencia (% , h netas/h programadas)  
**F.P.** : Factor de Perforabilidad (t/m)

### 2.3.2. Indicadores de Productividad de Mantenimiento

- **Disponibilidad Mecánica (%):** Indicador que nos da la relación entre las horas de intervenciones de mantenimiento, respecto a las horas utilizadas u horas brutas, motor encendido de la perforadora para operación.

$$Dm = \frac{H \text{ brutas} - H \text{ mantenimiento}}{H \text{ brutas}} \times 100$$

- **Tiempo Media Entre Fallas (MTBF):** El tiempo promedio entre fallas indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de una falla; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento "falla". Mientras mayor sea el valor del MTBF, mayor es la confiabilidad de sistema, componente o equipo.

$$MTBF = \frac{H \text{ brutas}}{N^{\circ} \text{ Fallas}}$$

- **Tiempo Media Para Reparar (MTTR):** El tiempo promedio para reparar es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de

operación, una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio, por una falla, dentro de un periodo de tiempo dado.

El tiempo promedio para reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir a la eficacia de ejecución del mantenimiento.

$$MTTR = \frac{H \text{ mantenimiento}}{N^{\circ} \text{ Fallas}}$$

- **Confiabilidad:** Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica, no falle, bajo condiciones de operación determinadas en un periodo de tiempo específico.

La confiabilidad se relaciona básicamente con la tasa de fallas o cantidad de fallas y con el tiempo medio de operación (MTBF). Mientras el número de fallas de un equipo vaya en aumento, o mientras el MTBF de un equipo disminuya, la confiabilidad del mismo será menor.

$$\beta = e^{-\left(\frac{t}{MTBF}\right)}$$

Donde:

**t** : Intervalo de tiempo previsto de operación (Horas)

**e** : Número de Euler, base del logaritmo neperiano (e=2.7182..)

### 2.3.3. Distribución de Horas de Perforadora

Se sabe que un equipo en general, su eficiencia de operación no es del 100%, y esto debido a muchos factores que contribuyen o no, a la productividad máxima de un equipo.

Para el control de las horas de operación de los equipos de perforación rotativa, en general de las actividades, se clasifica según el criterio:

- **Actividades Productivas**
  - Perforación de taladros.
- **Actividades Contributorias**
  - Reparto de guardia
  - Almuerzo o descanso nocturno
  - Cambio de broca
  - Traslado a otro proyecto de perforación, etc.
- **Actividades No Contributorias**
  - Falla mecánica
  - Falta de movilidad para traslado de operadores
  - Falta de energía media tensión
  - Traslado por voladura
  - Falta de agua para perforación, etc.

Las horas cronológicas o calendario para un equipo, son las horas totales que para un análisis detallado de su productividad, se dividen de la siguiente manera, ver **Figura 22**:

- **Horas Programadas:** Horas acumuladas de operación del equipo.
- **Horas No Programadas:** Horas acumuladas sin operación o paradas programadas sin permiso para operar, días libres, huelgas, etc.

- **Horas Mantenimiento:** Horas acumuladas de intervenciones mecánicas y/o eléctricas, mantenimientos correctivos o preventivos, esperas por la intervención, etc.
- **Horas de Parada o de motor apagado:** Horas acumuladas de parada con motor apagado, por falta de recursos, cortes de energía, almuerzo, paradas de seguridad, descanso nocturno, etc.
- **Horas Brutas con motor encendido:** Horas acumuladas de motor encendido en operación, por traslados entre proyectos, traslados por voladura, perforación, cambio de barrenos, etc.
- **Horas Netas:** Horas que se generan en la producción, como: perforación de taladros.
- **Horas con motor encendido improductivas:** Horas horómetro que no incluyen las actividades de producción, como traslados, cambio de barrenos, demoras, etc.

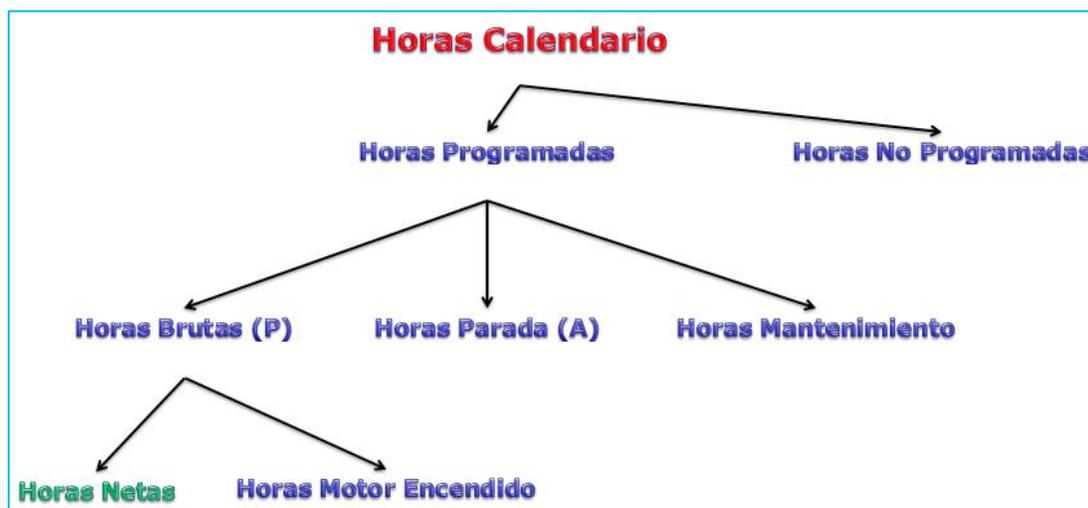


Figura 22.- Distribución de Horas Cronológicas de una Perforadora Rotativa.

Fuente: Elaboración propia.

### CAPÍTULO III

## ASPECTOS GENERALES Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA OPERACIÓN MINERA MARCONA

### 3.1. ASPECTOS GENERALES DE LA OPERACIÓN MINERA

#### 3.1.1. Ubicación Geográfica

**San Juan de Marcona** es una localidad minera y portuaria; además de ser el primer y más grande distrito productor de hierro en el Perú. Es conocida como la capital del hierro y cuna del pingüino de Humboldt, en la costa del Perú.

Este distrito está ubicado en el extremo sur de la provincia de Nazca, región Ica, en una zona desértica y arenosa en la cual durante 8 meses del año se cubren de densas neblinas.

Dentro del distrito, se encuentra la Mina de Marcona operada actualmente por la compañía minera China **SHOUGANG HIERRO PERÚ S.A.A.** Esta mina limita al sur y oeste con una serie de terrazas marinas, hacia el norte con el cerro Tunga y al este con una escarpa de falla.

Las minas se encuentran en un triángulo, cuyos otros vértices son los puertos de San Juan y San Nicolás. La distancia de San Juan a San Nicolás es 16 Km, de San Nicolás a la mina es 15 Km y de San Juan a la Mina es 28 Km., ver **Figura 23**.



**Figura 23.- Mapa de Ubicación Geográfica del Distrito de Marcona, Provincia de Nazca, Ica.**

**Fuente: Mapa del Perú.**

Para acceder a las minas por tierra, mediante un desvío de aproximadamente 40 km. de distancia, hacia el oeste de la Panamericana Sur, Km.490. Por aire se cuenta con un aeropuerto en San Juan con una pista asfaltada de 2100 metros de longitud y por mar se cuenta con dos puertos, el de San Juan y San Nicolás, ver **Figura 24**.



**Figura 24.- Puerto de San Nicolás año 2009.**

**Fuente: PROINVERSIÓN Perú.**

### 3.1.2.Historia

- En 1870 el sabio italiano **Antonio Raimondi** hizo pública la existencia de un depósito de hierro en las Pampas de Marcona.
- En 1925 el gobierno del Presidente **Augusto B. Leguía** declara a Marcona reserva nacional, para su futura explotación.
- En 1943 el estado peruano crea la **Corporación Peruana del Santa** para la explotación de Carbón y Hierro en esta zona, comprobando así las enormes reservas de hierro, que en poco tiempo un grupo de empresas estadounidenses adquirieron la concesión minera.
- En 1952 La **Corporación Peruana del Santa** firma un contrato de exploración y explotación con la empresa estadounidense **The Utah Construction Company**. Luego se formó **Marcona Mining Company** con **The Utah C. C.** y **The Cyprus Mines Corporation**.
- El 2 de mayo de 1955, mediante ley N°12314 se crea el Distrito de Marcona, ver **Figura 25**.
- En 1975 el gobierno militar del General **Juan Velasco Alvarado**, estatizó el yacimiento de Marcona y se crea la empresa **HIERRO PERÚ**, encargándose de la administración, explotación y comercialización del hierro en el Perú.
- En 1992 el gobierno del Presidente **Alberto Fujimori** privatizó la empresa estatal, la cual es adjudicada a la corporación **SHOUGANG** de China, formándose la minera **SHOUGANG HIERRO PERÚ S.A.A.** que hasta la actualidad explota y comercializa con China el mineral de hierro.



*Figura 25.- Distrito San Juan de Marcona en el año 2004.*

*Fuente: Foro Web.*

### 3.1.3.Clima y Relieve

El clima de San Juan de Marcona es cálido y árido, con escasas precipitaciones, determinado, básicamente, por su ubicación geográfica y por su proximidad al océano pacífico. La temperatura máxima supera los 30 °C, de enero a marzo, y, la mínima de 16 °C en el mes de agosto. La temperatura promedio anual es de 18 °C a 23 °C.

Durante cada cambio de estación se producen fuertes vientos de arena y tierra llamados “Paracas”.

El relieve de Marcona es característico de un desierto típico de la costa central y sur del Perú, hallándose mesetas, pampas y altos cerros; ricos en minerales como el hierro y cobre. Marcona tiene una gran riqueza marina a lo largo de su litoral; con amplias bahías, ensenadas y puntas, que dan forma a una gran variedad de playas, ver **Figura 26**.



**Figura 26.- Unidad Minera Marcona - Shougang año 2015, Relieve Típico de la Zona.**  
**Fuente: COSAPI MINERIA.**

### **3.1.4. Geología**

Según estudios realizados, el yacimiento es un **depósito hidrotermal metasomático** con posterior enriquecimiento supérgeno de sulfuros. La fuente de las soluciones mineralizantes ha sido el batolito granodiorítico de San Nicolás, en el cual la Dacita, como apófisis del macizo ígneo, se separó durante la cristalización, llevando soluciones de hierro a las rocas encajonantes. Estas soluciones residuales de hierro, causantes de la mineralización, actuaron sobre rocas solubles, tales como dolomitas y sedimentos calcáreos del paleozoico, transformándolos metasomáticamente. El metasomatismo ha sido progresivo, formando grandes bolsones de magnetita y pequeñas cantidades de sulfuros. La formación Cerritos, recibió la mineralización muy semejante al de la formación Marcona.

#### **3.1.4.1. Geología Regional**

Depósitos ubicados en una meseta esculpida, formando una plataforma de erosión marina que se encuentra a 800 msnm a 10 Km. del Océano Pacífico.

El yacimiento de mineral de Marcona, se presenta en forma de una faja de 20 Km. de largo por 5 Km. de ancho, cuyo eje longitudinal sigue la dirección de la cadena de montañas de la Cordillera Occidental de los Andes y paralelas al Océano Pacífico.

Dentro de ésta estructura estratificada es donde yacen los cuerpos mineralizados, que se encuentran en concordancia con rocas intrusivas ya sea como diques, capas o derrames tubulares que cruzan y cortan todas las formaciones, siendo la mayoría de esas rocas post-mineral y en menor cantidad de pre-mineral.

La zona pertenece a la cordillera de la costa formada por el gran batolito de granodiorita de edad cretácico superior, que intruyó principalmente a metamórficos precámbricos, meta-sedimentos marinos paleozoicos del período carbonífero inferior, meta-sedimentos terrestres y

meta-volcánicos mesozoicos de edad jurásica. Además, se encuentra tufos con sedimentos del cretácico inferior y superior, sedimentos terciarios muy poco inclinados y no muy consolidados.

#### 3.1.4.2. Columna Estratigráfica

- **Complejo Lomas - Estrato inferior a 8,83Km:** Nombre local debido a que la punta del puerto de Lomas está formada por este tipo de formación precámbrica metamórfica, constituida por arcosas, areniscas cuarzosas, y meta-arcosas rosadas de grano grueso, gneis (ortogneis y paragneis), esquistos micáceos y migmatitas. Existiendo afloramientos en el sur del área minera.
- **Formación Marcona – Estrato de 7,23Km a 8,83Km:** Se encuentra encima de la formación anterior en discordancia, proviene de la era paleozoica del período carbonífero inferior. Consta principalmente de meta-sedimentos marinos: hornfels silicificados y filíticas, dolomitas, cuarcitas, hornfels arcósicas y conglomeráticas. Espesor de 1.6 Km. y es la de mayor importancia económica, pues en ella se encuentran los principales yacimientos de hierro, esparcidas en dos horizontes de mineralización, orientadas en general con rumbo noreste - suroeste.
- **Formación Cerritos – Estrato de 1,23Km a 7,23Km:** Está en discordancia sobre la formación anterior. Tiene 6 Km. de espesor, aproximadamente, con abundante diseminación de magnetita, principalmente, en la zona inferior; Formada por brechas sedimentarias y conglomeráticas, así como, por flujos andesíticos, tufos y areniscas tufáceas y feldespáticas; conteniendo fósiles llamados Rhynchonella del jurásico medio. En esta formación se encuentran yacimientos de baja ley de hierro y alto contenido de azufre. En la zona superior se observa actividad volcánica intensa y sedimentación de calizas fosilíferas, sedimentos tufáceos, brechas volcánicas, tufos andesíticos y areniscas feldespáticas-arcósicas.

- **Formación Copara – Estrato de 0,53Km a 1,23Km:** Encima de la anterior, en discordancia con rocas de edad cretácica inferior, basada en restos fósiles vegetales, arcillas, sedimentos calcáreos, areniscas carbonáceas y tufos. La potencia aparente es de 0,7 Km. y sin interés económico.
- **Formación Pisco – Estrato de 30m a 0,53Km:** A continuación, por encima de una superficie de discordancia angular y de erosión tenemos a rocas sedimentarias de edad terciaria con una potencia aproximada de 0,5 Km., que contiene arcillas bentoníticas y yesíferas, finas areniscas fosilíferas y cenizas volcánicas. De posible interés comercial por la bentonita.
- **Aluvión – Estrato de 0 a 30m:** Es el encapado de sedimentos marinos cuaternario estratificado no consolidado de arena, rodados heterogéneos, grava, diversas especies de fósiles marinos, una costra dura de yeso, sales de magnesio, sodio y carbonato de calcio llamada “caliche”. El aluvión es de espesor variable, siendo muy potente cerca de las colinas y antiguas escarpas marinas.
- **Rocas Intrusivas:** Existe variedad en la edad, composición, tamaño y texturas de las rocas plutónicas del área, ya sea ácidas o básicas. Existiendo dos batolitos principales, al Este y al Oeste, la cual están muy estrechamente relacionados, además numerosos cuerpos intrusivos menores que presentan muchas veces diferentes grados de metamorfización. Así, en el área de la mina se encuentran:
  - **Granodiorita de San Nicolás:** Batolito que aflora en San Nicolás. Los yacimientos de hierro de Marcona, están íntimamente ligados a este macizo.
  - **Dacita:** Roca ligeramente porfirítica de color rosado verduzco. Se presentan como diques, capas intrusivas o masas de contactos irregulares y sinuosos. Posible portadora de las soluciones residuales originarias de los yacimientos de hierro.

- *Diques básicos:* Relacionadas a las formaciones Lomas, Marcona y Cerritos. Pueden ser pre-mineral como las basáltico-doleríticas (irregulares – sinuosos) o las post-mineral como las andesíticos-dioríticos (regulares).
- *Andesita:* Es post-mineral, diques bien definidos regulares, de textura porfirítica con grandes fenocristales de plagioclasas, color negruzco grisáceo o rosáceo. Abundan en la formación Marcona y Cerritos, orientación norte-sur o noroeste-sureste.
- *Granodiorita:* Intrusiones post-mineral, orientación norte-sur y noroeste-sureste. Se presentan en delgados diques y masas pequeñas de color rojizo y textura equigranular fina. Se localiza en pocas cantidades en las formaciones Marcona y Cerritos.

#### 3.1.4.3. Geología Estructural

Todo el conjunto estratificado del yacimiento Marcona, se encuentra determinado en una estructura homoclinal, con rumbo SO-NE y Buzamiento promedio de 35°NO.

Dentro del yacimiento Marcona, se han identificado tres sistemas de fallas principales, las cuales se han relacionado por sus rumbos y buzamientos, aproximadamente iguales.

La edad geológica de estos sistemas de fallas, se han relacionado principalmente por su relación con sus rocas adyacentes y edades relativas.

- **Fallas Pista:** Es el sistema más antiguo, posiblemente formado antes de la mineralización. Es de tipo normal gravitacional, originada por acción de la gravedad, y tiene como rumbo N65°E y buzamiento 60°NO.
- **Fallas de Repetición:** Es el sistema el cual se encuentra paralelo a la estratificación. Es de tipo tensional-compresional inversa y tiene como rumbo N45°E y buzamiento 65°SE.

- **Fallas La Huaca:** Es el sistema de falla más reciente y más grande, el cual se encuentra paralelo a la cordillera de los Andes. Es de tipo normal y tiene como rumbo N25°O y buzamiento 65°NE.

#### 3.1.4.4. Litología

Los principales minerales de hierro que se encuentran en el yacimiento Marcona, son:

- **Hematita ( $Fe_2O_3$ ),** Masiva y ligeramente porosa de color marrón rojizo y mayormente dura.
- **Martita ( $Fe_2O_3$ ),** Variedad de hematita, también masiva de color gris azulado y dura.
- **Limonita ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ),** Suave y amorfa de color amarillento. No es común.
- **Magnetita ( $Fe_3O_4$ ),** Masiva y finalmente criptocrystalina, aunque a veces existen cristales de regular tamaño; suave a muy dura, de color negro muy atraíble por el imán; es el más abundante, ver **Tabla 6**.

**Tabla 6.- Densidad por Tipo de Material.**

<b>DENSIDAD (gr/cc) POR TIPO DE MATERIAL</b>	
<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>DENSIDAD IN SITU</b>
TO	3.96
MD/TO	3.76
PO	4.47
MD/PO	3.96
ER/D/QZ	2.74
EA	1.83

<i>Mineral Transicional (TO)</i>	<i>Lo conforma el mineral de hierro, hematita, martita.</i>
<i>Mineral Primario (PO)</i>	<i>Lo conforma el mineral de hierro, magnetita.</i>
<i>Desmante (D)</i>	<i>Lo conforman diques básicos, dacitas y andesitas.</i>
<i>Cuarcita (QZ)</i>	<i>Conformado por cuerpos de cuarcita.</i>
<i>Encape de Roca (ER)</i>	<i>Lo conforman las rocas tipo hornfels, dolomita y actinolita.</i>
<i>Encape de Arena (EA)</i>	<i>Lo conforma el material aluvial compuesta por conglomerados y/o rocas sedimentarias.</i>

**Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERÍA**

La litología del yacimiento de Marcona, está compuesta por las siguientes rocas, ver **Tabla 7**.

**Tabla 7.- Litología del Yacimiento Marcona.**

MATERIAL	CODIGO	DESCRIPCIÓN
<b>OXIDOS</b>	OX	Alto Contenido de Hematita
<b>PRIMARIO</b>	PO	Alto Contenido de Magnetita
<b>HORNFELS</b>	HFS	Roca metamórfica asociada a cuerpos ígneos
<b>ANDESITA</b>	PA	Roca ígnea volcánica de grano fino
<b>DACITA</b>	DAC	Roca ígnea volcánica de grano fino (pórfidos de cuarzo)
<b>DOLOMITA</b>	DOL	Roca sedimentaria (Carbonato de calcio y magnesio)
<b>CUARCITA</b>	QZ	Roca metamórfica dura con alto contenido de cuarzo
<b>GRANODIORITA</b>	GDD	Roca ígnea plutónica de grano grueso (contiene cuarzo)
<b>ALUVIAL</b>	QAL	Material de erosión.
<b>ACTINOLITA</b>	ACT	Silicato asociado a las rocas metamórficas (Cuarcita)
<b>ARENISCA</b>	SS	Roca sedimentaria de resistencia media

*Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERIA.*

### **3.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA OPERACIÓN MINERA**

#### **3.2.1.Descripción de la Operación Minera**

Las Minas que se vienen explotando en la Ampliación de Marcona, se ha dividido en 4 etapas, siendo la etapa I, ya ejecutada desde Octubre del 2013 hasta Octubre del 2015 (2 años). La etapa II reinició en Marzo del 2017; planificada para 3 años.

#### **3.2.2.Alcance de la Operación Minera**

La operación consiste en extraer el material estéril y mineral de estas minas, luego transportarlo a lugares indicados según los diseños y planes de minado, que pueden ser las áreas de chancado primario, canchas de mineral o botaderos de desmote.

Está previsto, extraer durante 8 años aproximadamente, 400 MM t., en la etapa I la producción total de material alcanza 93 MM t. durante 25 meses, según estimados del área de planeamiento mina y geología, ver **Tabla 8**.

**Tabla 8.- Producción de la Etapa I por Tipo de Material Minado.**

MATERIALES	TONELAJE (t)
Encapado de Roca (incluye arenales)	86 MM
Mineral Oxidado	2 MM
Baja Ley de Mineral Oxidado	1 MM
Desmante	4 MM
<b>TOTAL</b>	<b>93 MM</b>

*Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERÍA.*

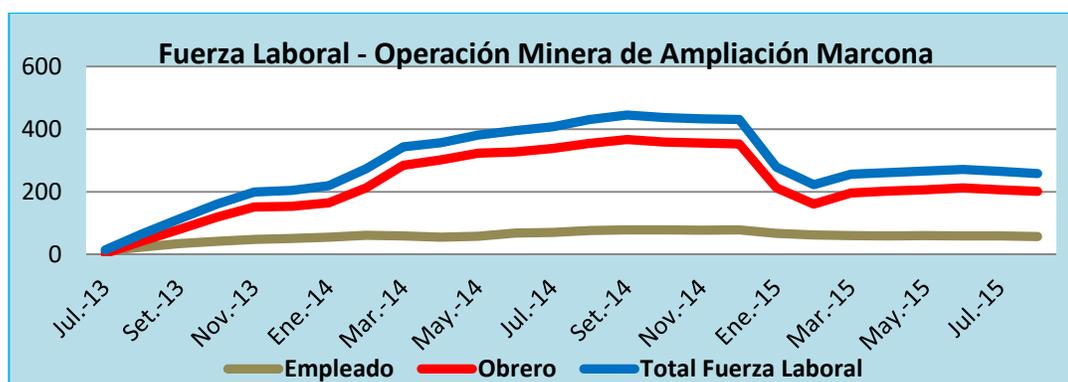
El desarrollo de las operaciones, en las minas de la ampliación Marcona, comprende las actividades de perforación, voladura, carguío y acarreo de materiales.

También comprenden los servicios auxiliares como: mantenimiento de vías, perfilado de taludes, control topográfico, entre otros.

### 3.2.3.Fuerza Laboral

La mayor fuerza laboral de la operación minera, está compuesta por operadores de equipos mineros, seguido de personal de mantenimiento mecánico, mantenimiento eléctrico, perforación y voladura.

Durante la ejecución de la operación minera, se tuvo como pico 445 trabajadores, entre personal obrero y empleado, ver **Figura 27**.



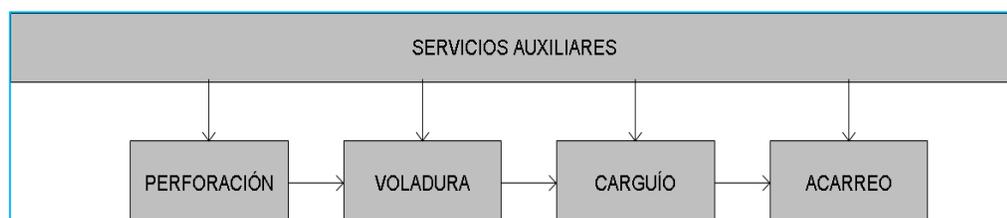
**Figura 27.- Histograma de Fuerza Laboral para la Etapa I.**

*Fuente: Administración, COSAPI MINERÍA.*

Entre los meses de diciembre del 2014 y enero del 2015, se nota una gran reducción de personal, esto debido a la disminución de las toneladas producidas.

### 3.2.4. Operaciones

Está determinado por el ciclo de minado, que consta básicamente de cuatro etapas: **Perforación, Voladura, Carguío y Acarreo**; sin dejar de lado los trabajos o servicios auxiliares que se realizan como apoyo antes, durante y después de cada etapa para que estas puedan ser ejecutadas correctamente, ver **Figura 28**.



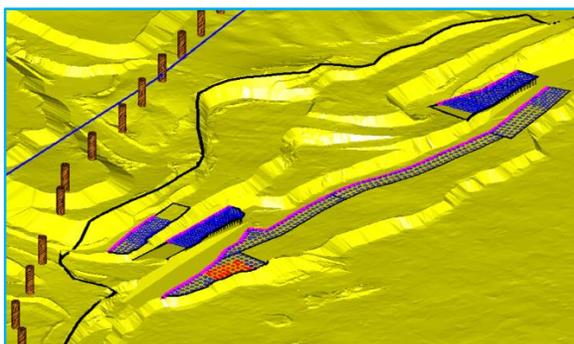
**Figura 28.- Ciclo de Minado en la Operación Minera de Ampliación Marcona.**

**Fuente: Operaciones, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.4.1. Perforación

En la operación minera de ampliación Marcona, la actividad de perforación se desarrolla de la siguiente manera:

- **Planificación.-** Dentro del plan de minado anual, mensual y semanal, se diseñan los proyectos de perforación. Según el tipo de roca se estandarizan los diferentes tipos de malla de perforación, ver **Figura 29**.



*Figura 29.- Plan de Perforación Mensual.*

*Fuente: Planeamiento, COSAPI MÍNERIA.*

- **Preparación de Plataforma de Perforación.-** Se preparan las plataformas de perforación, desniveles menores a 12°, para que ingresen las perforadoras. Así mismo, se preparan vías secundarias para equipos auxiliares como: cisterna de agua, cisterna de combustible, camión fábrica y minicargador, ver **Figura 30**.



*Figura 30.- Equipo Auxiliar Realizando la Preparación de Plataforma de Perforación.*

*Fuente: Operaciones, COSAPI MINERIA.*

- **Marcado de Taladros.-** Concluida la preparación de la plataforma de perforación, el equipo de topografía marca, en el proyecto, la malla de perforación, según el planeamiento aprobado, burden, espaciamiento, altura de perforación y *subdrilling*, ver **Figura 31**.



*Figura 31.- Malla de Perforación Marcada por el Área de Topografía.*

*Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERIA.*

- **Traslado de perforadora al proyecto de perforación.-** Se inicia el traslado de la perforadora a la plataforma seleccionada, se ubica en el primer punto marcado y se inicia con la perforación de taladros de toda la malla, según proyecto, ver **Figura 32**.



*Figura 32.- Traslado de Perforadora Rotativa Eléctrica Sandvik 1190E.*

*Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.*

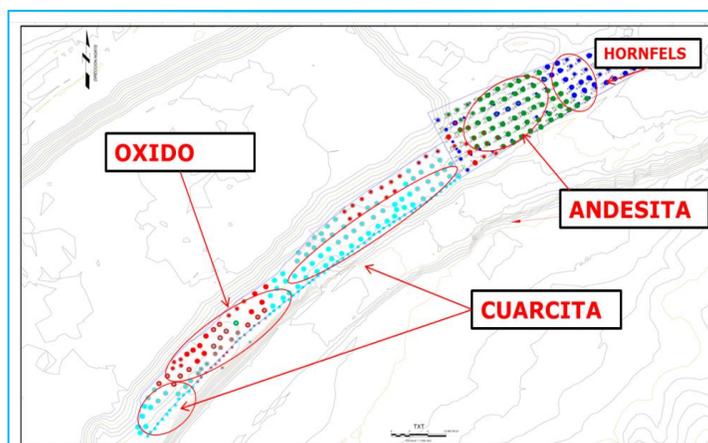
- **Perforación.-** Se continúa con la perforación, hasta terminar todos los taladros del proyecto. Luego se procede a trasladar el equipo al siguiente proyecto, según secuencia del plan de minado, ver **Figura 33**.



**Figura 33.- Perforación Rotativa de Taladros por una Perforadora Sandvik 1190E.**

**Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.**

- **Logeo Geológico de conos de perforación.-** Después de terminado la actividad de perforación, se procede a obtener información geológica o logeo de los detritos dispuestos en el cono de perforación de los taladros, reconociendo y confirmando a qué tipo de material corresponde, ver **Figura 34**.



**Figura 34.- Planos de Logeo Geológico.**

**Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.4.2. Producción y Rendimientos de Perforación

La producción de perforación en toneladas perforadas, desde octubre del año 2013, inicio de la explotación, fue mínima, ya que se estaba en una etapa de preparación y habilitación de plataformas.

La producción en el año 2014, aumentó por la llegada de las perforadoras rotativas eléctricas, así mismo, por el requerimiento de las operaciones de carguío y acarreo, en la necesidad de mayor material, como stock de minado, ver **Figura 35**.



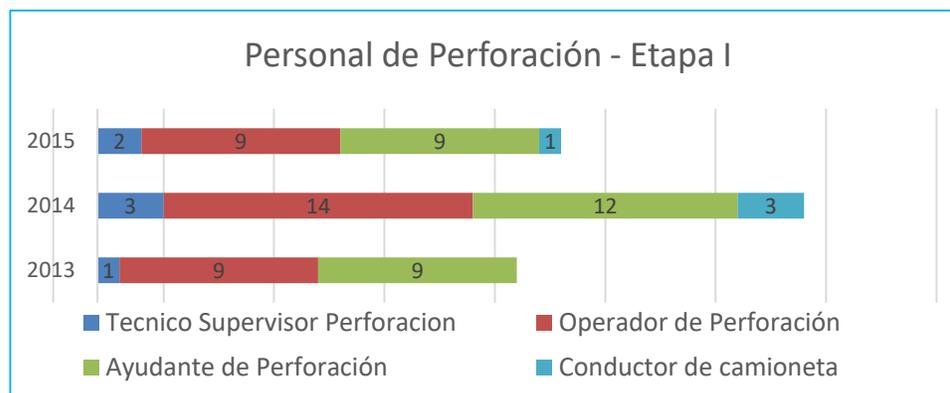
**Figura 35.- Toneladas Perforadas en Etapa I de la Operación Minera de Ampliación Marcona.**

**Fuente: P&V, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.4.3. Recursos de Perforación

- Personal

Personal colaborador del área de perforación, ver **Figura 36**.



**Figura 36.- Distribución de Personal en la Etapa I.**

**Fuente: Administración, COSAPI MINERIA.**

- Equipos

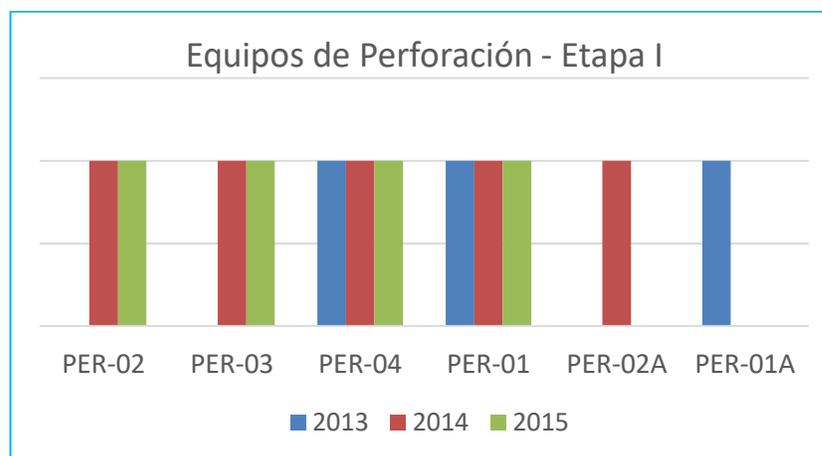
En la operación minera de ampliación Marcona, se utilizarán equipos roto-percutivos para perforación secundaria y voladura controlada; y equipos rotativos para perforación primaria, ver **ANEXO 08**, los cuales se muestran en la **Tabla 9**:

**Tabla 9.- Perforadoras Utilizadas en Perforación Primaria y Secundaria.**

Modelo	Código Mina	Tipo	Energía	Perforación
SANDVIK 1190E	PER-02	Rotativa	ELÉCTRICA	Primaria
	PER-03	Rotativa	ELÉCTRICA	Primaria
	PER-04	Rotativa	ELÉCTRICA	Primaria
SANDVIK D245S	PER-01	Roto-percut.	DIESEL	Secundaria y Vol. Controlada
CAT MD6420	PER-02A	Rotativa	DIESEL	Primaria
TEREX	PER-01A	Roto-percut.	DIESEL	Secundaria y Vol. Controlada

**Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.**

A continuación, se muestra en la **Figura 37**, el histograma de uso de perforadoras según el año de operación:



**Figura 37.- Equipos de Perforación Según el Año de Operación.**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.5. Costos

El objetivo principal del control de costos es cuantificar y reportar el margen o contribución económica de la operación minera para detectar desviaciones en el resultado económico con respecto a la línea base actualizada, analizar sus causas y brindar alertas en forma oportuna para que el equipo de dirección tome las acciones pertinentes.

Las principales funciones para un adecuado control de costos son las siguientes:

- Elaborar el plan de fases.
- Cuantificar los costos reales incurridos.
- Elaborar la proyección de costos, en coordinación con las áreas de producción, planificación y gerencia.

- Generar reportes que ayuden a visualizar el uso de los recursos en la operación y su impacto en el costo.

### 3.2.5.1. Plan de Fases

Las fases en las que se dividen los costos de perforación, se muestran en la **Tabla 10**:

*Tabla 10.- Fases de Costos de Perforación.*

FASE	DESCRIPCIÓN	ÍTEMS
ZC	SUPERVISIÓN	a) Sueldos, beneficios sociales de la supervisión y personal de apoyo.
BBACC	PERFORACIÓN	a) Mano de obra: sueldos de operadores de equipos de perforación y auxiliares como cisternas de agua, beneficios sociales, alojamiento, alimentación, movilidad, EPP's, exámenes médicos.
		b) Materiales: combustible, materiales de uso de los equipos alquilados.
		c) Equipos propios
		d) Equipos alquilados
		e) Transporte logístico
		f) Depreciaciones

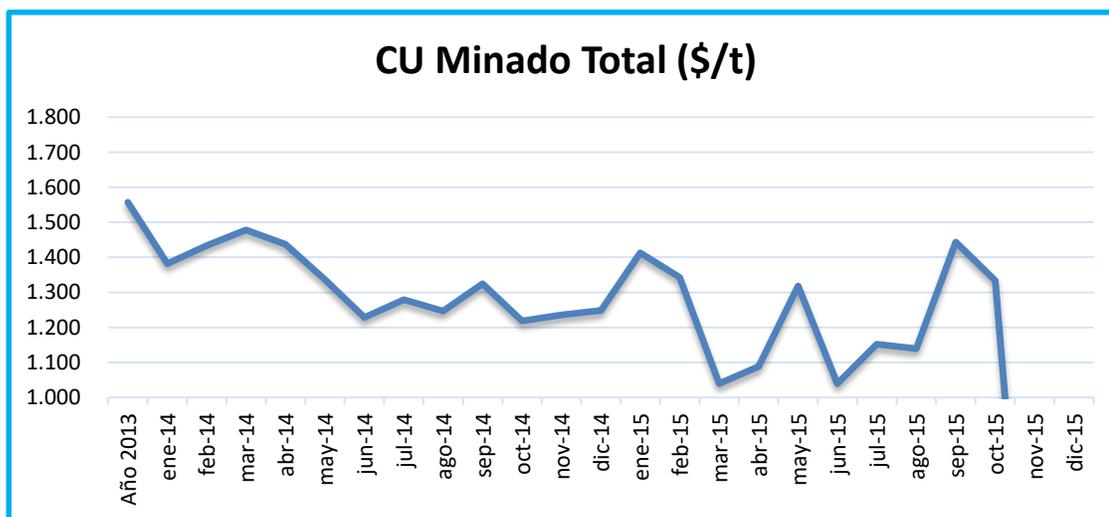
*Fuente: Costos, COSAPI MINERÍA.*

Dentro de las buenas prácticas, para la mejora continua de la operación, se realiza un control diario de los costos y un seguimiento de los recursos tales como: mano de obra, barrenos de perforación, perforadora, etc., ver **Tabla 11**.



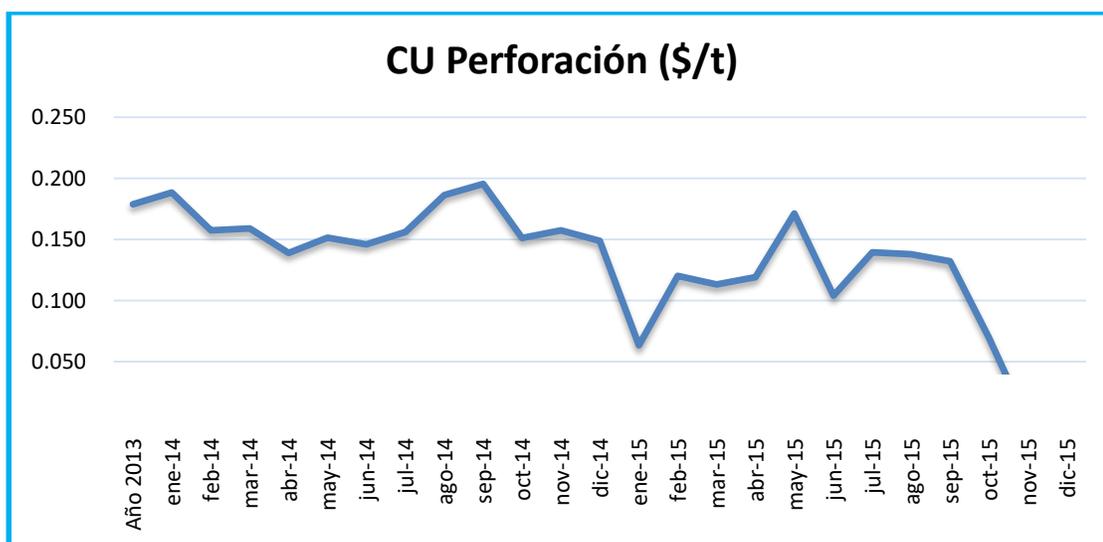
### 3.2.5.2. Costos por Fases

En esta parte, se ven los costos unitarios por cada fase en la etapa I, ver **Figura 38 y 39**.



**Figura 38.- Costo Unitario de Minado Etapa I.**

**Fuente: Costos, COSAPI MINERÍA.**



**Figura 39.- Costo Unitario de Perforación Etapa I.**

**Fuente: Costos, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.6.Productividad

La productividad tiene como objetivo brindar el soporte a la operación, monitoreando el desempeño de las operaciones mineras unitarias, empleando herramientas y técnicas de análisis de procesos para mejorar la productividad.

Para monitorear el desempeño de sus procesos en la operación: perforación, carguío, transporte y mantenimiento de vías, se requiere tomar datos en campo. Los datos de campo son obtenidos de la siguiente manera:

- **Partes diarios de las perforadoras.-** Para el proceso de perforación, se ha implementado un sistema de control que tiene como “input” los partes diarios por equipo.
- **Estudios de tiempos específicos de procesos críticos.-** Para los estudios de tiempos específicos se requiere un controlador de equipos.

#### 3.2.6.1. Control de Productividad de Perforación

El control de perforación, brinda información tomada de los reportes diarios de perforación los cuales son elaborados por los operadores, previa capacitación. Dicha información es procesada para calcular indicadores como: rendimientos, costos y actividades del proceso; además, de información técnica en la perforación de taladros tales como velocidad de rotación, *pulldown*, tipo de roca y otras variables, con la finalidad de facilitar la toma de decisiones y la generación de acciones correctivas inmediatas.

### 3.2.6.2. Estadística de los Indicadores por Proceso

- **Utilización (%)**

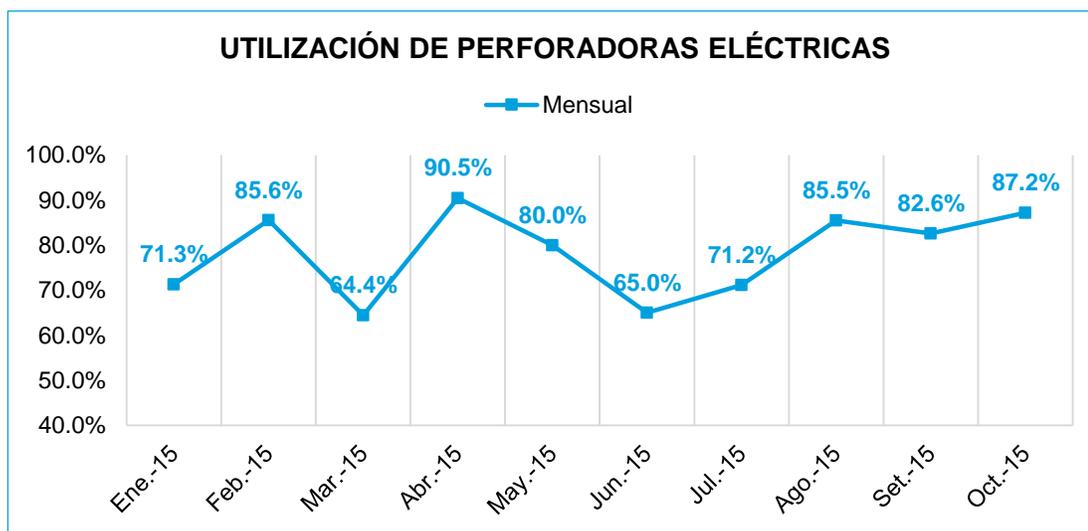


Figura 40.- Utilización Promedio de los Equipos de Perforación en año 2015.

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

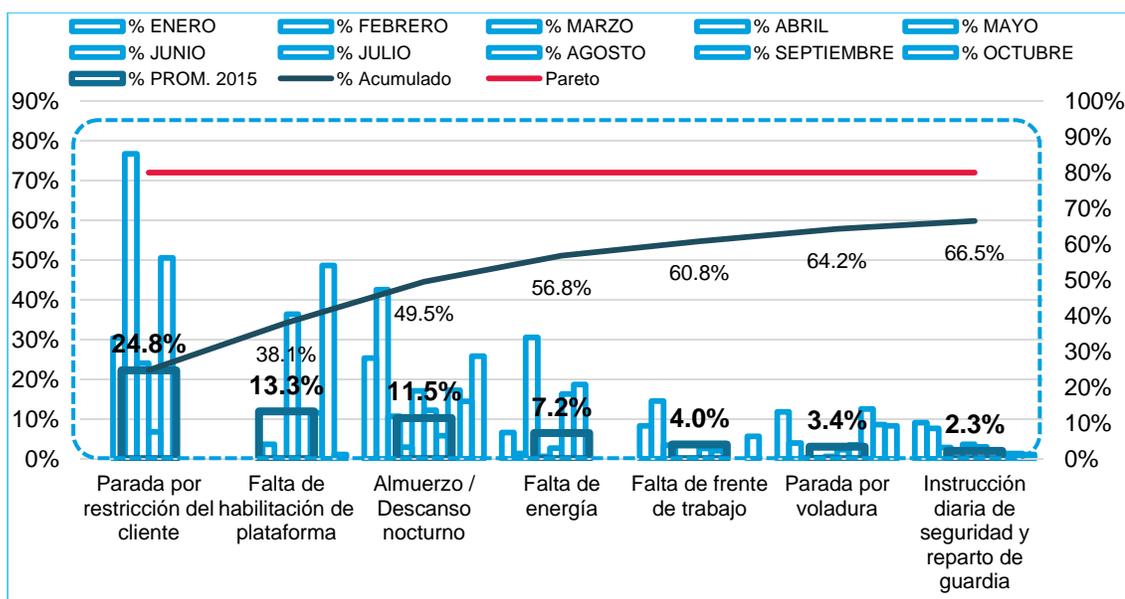
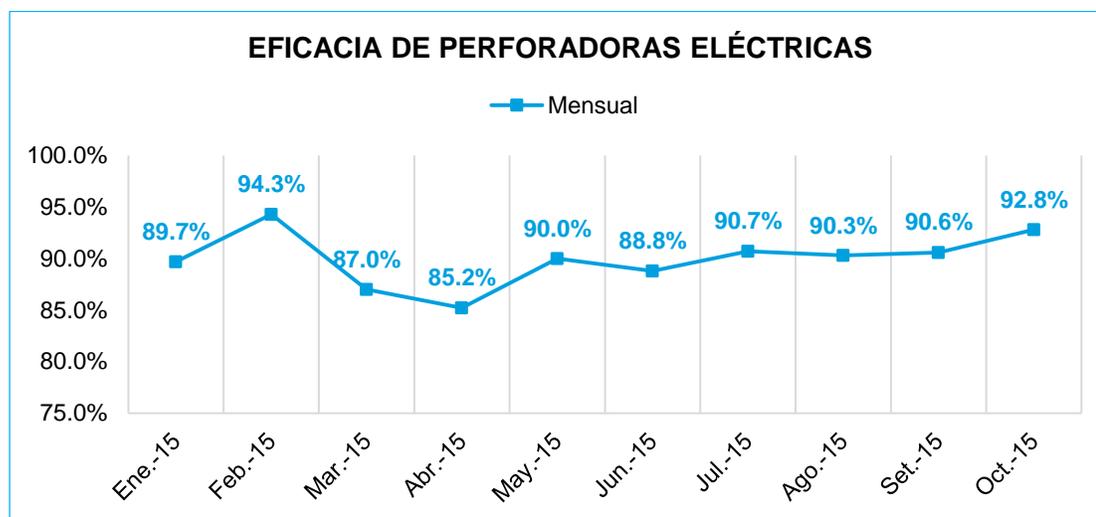


Figura 41.- Diagrama de Pareto de Actividades que Afectan la Utilización de Perforadoras.

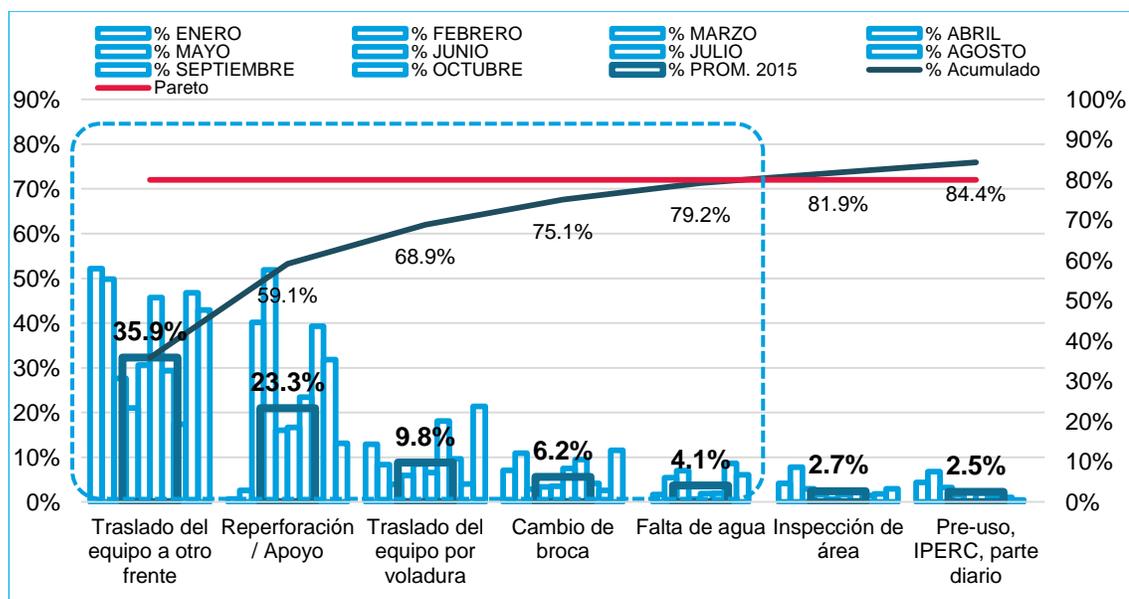
Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

- **Eficacia (%)**



**Figura 42.- Eficacia Promedio en Perforadoras en el año 2015.**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.**



**Figura 43.- Diagrama de Pareto de Actividades que Afectan la Eficacia de Perforadoras.**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.**

### 3.2.6.3. Estadística de Eficiencia en Perforación

Indicador que nos relaciona el porcentaje de horas netamente operativas de la guardia.

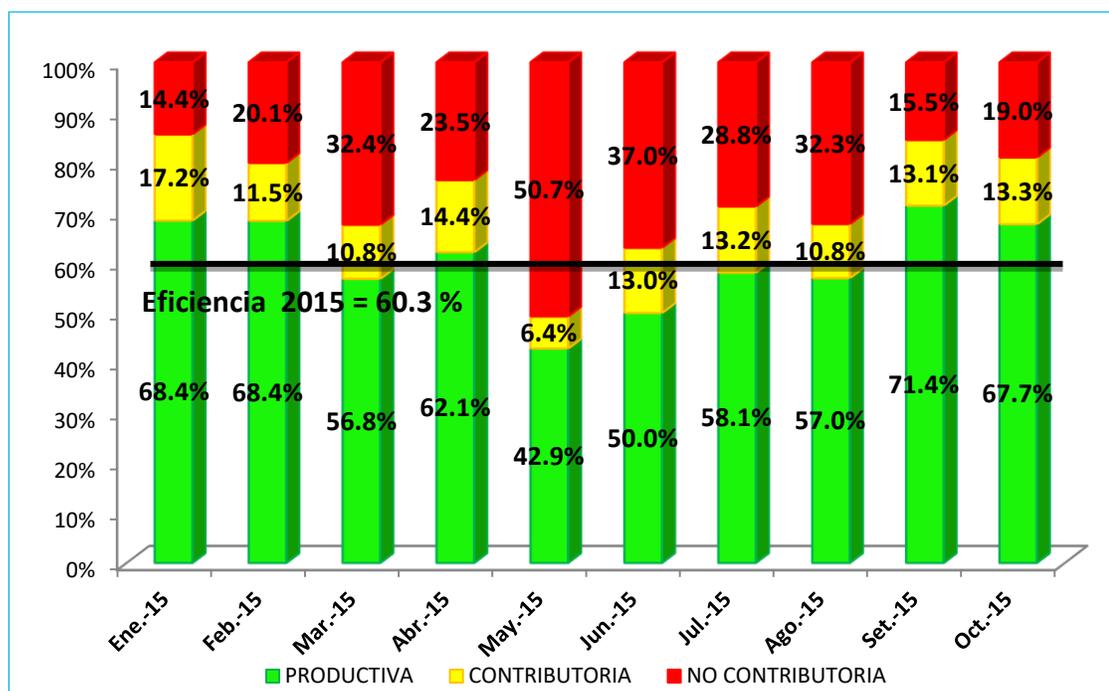
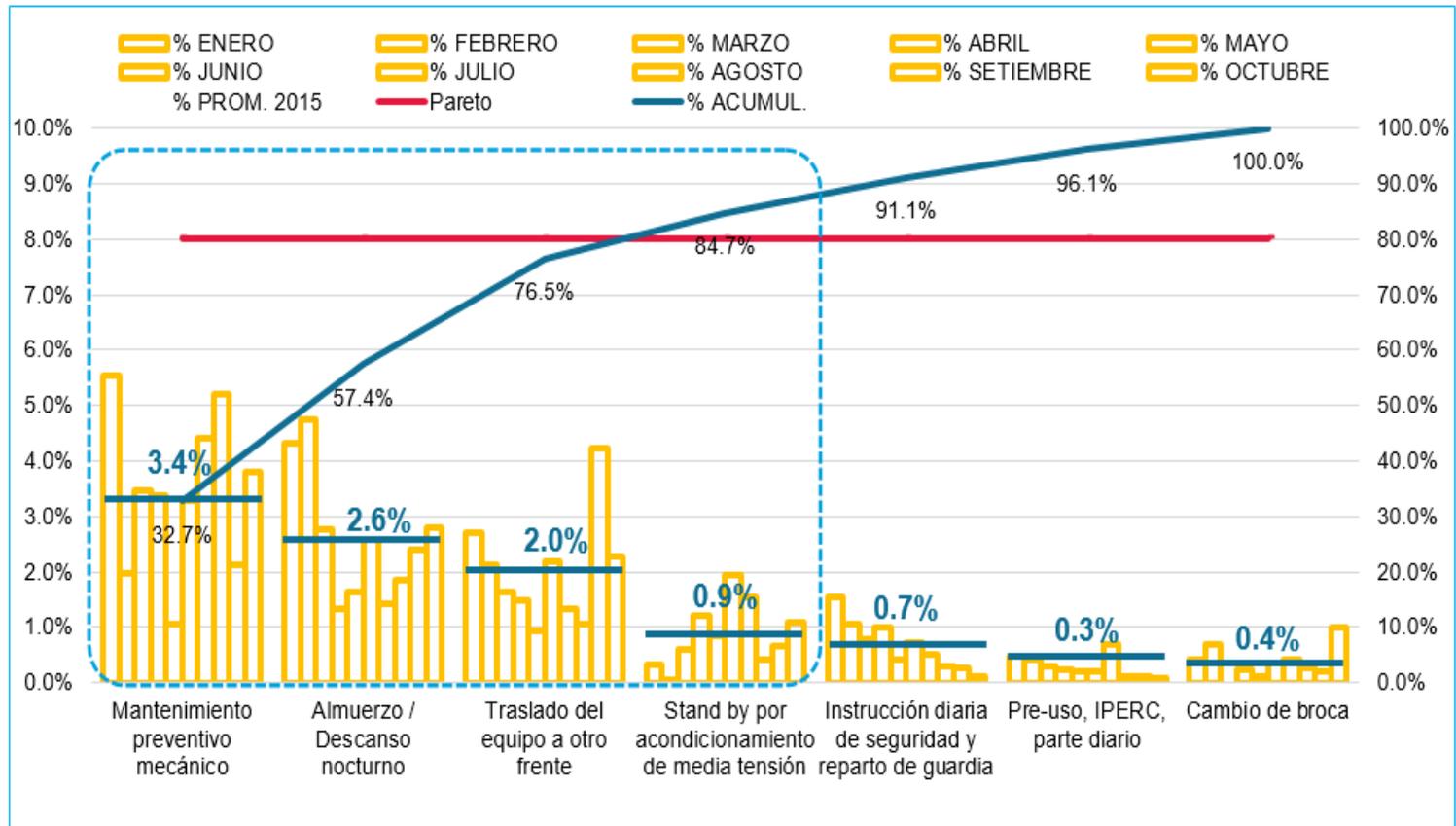


Figura 44.- Eficiencia Ejecutada en los Equipos de Perforación en el Año 2015.

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

- **Actividades Contributorias**



**Figura 45.- Diagrama de Pareto de Actividades Contributorias de Perforadoras en el Año 2015.**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.**

### Acciones correctivas en actividades contributorias:

- **Relevo de operadores a media guardia.-** Práctica impulsada para aumentar la utilización, disminuyendo las horas de **parada por almuerzo o descanso nocturno**, de las perforadoras eléctricas. Realizada cuando en la guardia el número de operadores supera la cantidad de perforadoras programadas para operación tanto en hora de almuerzo, turno día, o descanso nocturno, turno noche.
- **Control de traslados a otros frentes de trabajo.-** Se realiza cada vez que se traslada una perforadora entre proyectos no conexos, el cual sea de una distancia considerable. Esto nos permite minimizar los tiempos de traslados y acondicionamiento de cables media tensión, realizando una correcta planificación, ver **Tabla 12**.

**Tabla 12.- Control de Actividades en Traslados Largos de Perforadoras.**

TRASLADO DE MINA 11 A MINA 19 DE PER-03						
EQUIPO	ACTIVIDAD	HORA INICIO	HORA FIN	HORA INICIO PROG.	HORA FIN PROG.	RETRASO (min.)
PER-03	Acondicionado de Equipo para traslado.	07:14:00 a.m.	08:27:00 a.m.	06:50:00 a.m.	08:00:00 a.m.	-30
	Traslado del equipo	08:27:00 a.m.	12:40:00 p.m.	08:00:00 a.m.	12:00:00 p.m.	-13
	Parada de equipo por refrigerio	12:40:00 p.m.	01:38:00 p.m.	12:00:00 p.m.	01:00:00 p.m.	2
	Coordinación de encendido de equipo	01:38:00 p.m.	01:42:00 p.m.	01:00:00 p.m.	01:05:00 p.m.	1
	Traslado del equipo al frente	01:20:00 p.m.	02:00:00 p.m.	01:05:00 p.m.	02:00:00 p.m.	-15
	<b>Total</b>	<b>07:14:00 a.m.</b>	<b>02:00:00 p.m.</b>	<b>06:50:00 a.m.</b>	<b>02:00:00 p.m.</b>	<b>55</b>
	<b>Horario programado</b>	<b>6:50 - 14:00</b>				
	<b>Horario realizado</b>	<b>7:14 - 14:00</b>				

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.**

- **Relevo de operadores en caliente (cambio de guardia).**- Consiste en realizar el relevo de operadores y ayudantes en cambio de turno sin parar la producción del equipo. Esto nos permite producir toda la guardia, sin que afecte las actividades de: elaboración de IPERC, instrucción diaria, reparto de guardia, etc.

**Tabla 13.- Cronograma para Cambio de Guardia en Personal de Perforación.**

<b>Actividad</b>	<b>Hora Inicio</b>
<b>Salida de Bus Marcona - Mina</b>	5:25 a.m.
<b>Instrucción diaria</b>	6:10 a.m.
<b>Reparto de Guardia</b>	6:15 a.m.
<b>Traslado de Personal a Equipos</b>	6:25 a.m.
<b>Inicio de Perforación</b>	6:30 a.m. (Relevo de operador)

*Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.*

- **Actividades No Contributorias**

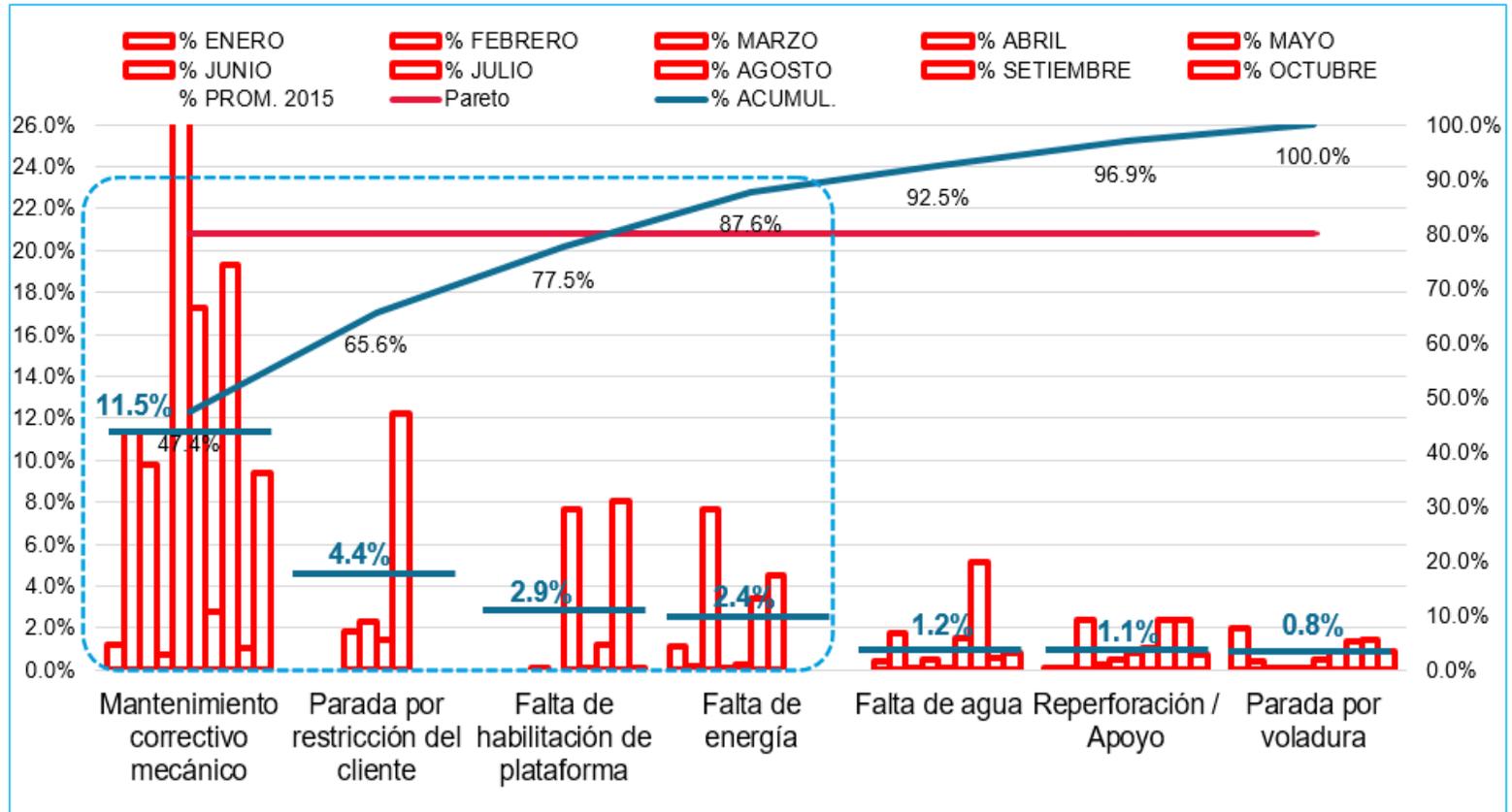


Figura 46.- Diagrama de Pareto de Actividades No Contributorias de Perforadoras.

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

### Acciones Correctivas en Actividades No Contributorias:

- **Control de traslados y paradas por voladura.-** Con el fin de disminuir los traslados y paradas por voladura; se realiza un planeamiento en el cual se estima tiempos y secuencia de traslado de perforadoras, también se realiza el seguimiento y se toma decisiones inmediatas, ver **Tabla 14**.

**Tabla 14.- Control de Traslados y Paradas de Perforadoras por Voladura**

TRASLADOS Y PARADAS POR VOLADURA MINA 14 Y 19 - PROYECTOS 07 Y 57								
MINA	EQUIPO	ACTIVIDAD	HORA INICIO	HORA FIN	HORA INICIO PROG.	HORA FIN PROG.	RETRASO (min.)	CAUSAS
19	PER-02	Traslado de equipo	11:25:00 a.m.	11:35:00 a.m.	11:15:00 a.m.	11:25:00 a.m.	10	Demora en el acondicionamiento de cable.
		Parada de equipo	11:35:00 a.m.	02:35:00 p.m.	12:00:00 p.m.	01:15:00 p.m.	105	Demora en traslado de personal al equipo.
14	PER-03	Traslado de equipo	11:45:00 a.m.	11:55:00 a.m.	11:30:00 a.m.	11:40:00 a.m.	15	Retraso de Mantenimiento media tensión
		Parada de equipo	11:55:00 a.m.	01:36:00 p.m.	12:00:00 p.m.	01:15:00 p.m.	26	Retraso de voladura por PAL-01
<b>Horas Perdidas por Voladura (Perforación)</b>							<b>2.6</b>	
			Horario programado	12pm - 1pm				
			Horario realizado	1pm - 1:30pm				

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

- **Control de taladros re-perforados y de ayuda.-** Con el fin de controlar los taladros improductivos, que generan pérdidas considerables en la rentabilidad, se realiza un registro, análisis, seguimiento y control, ver **Figura 47**.

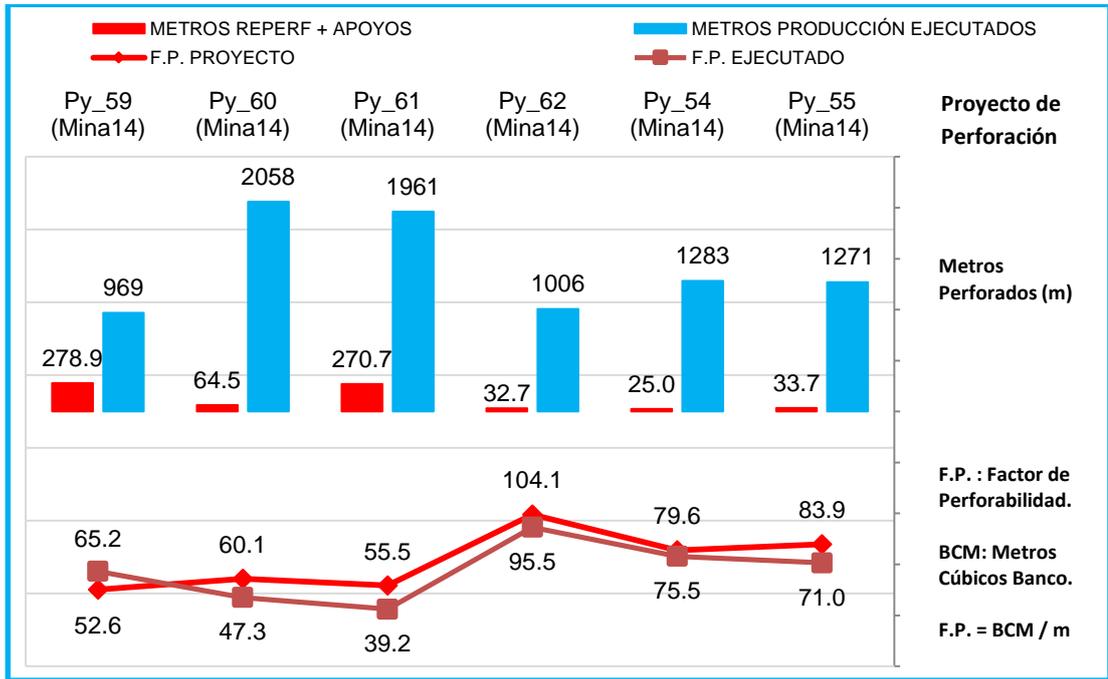


Figura 47.- Control de Cantidad de Metros Re-perforados Respecto a Metros de Producción.  
Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

3.2.6.4. Rendimientos de Perforación

- **Rango de penetración:** Es la cantidad de producción que realiza una unidad productiva, perforadora rotativa eléctrica, por hora de operación efectiva, ver **Figura 48 y 49.**

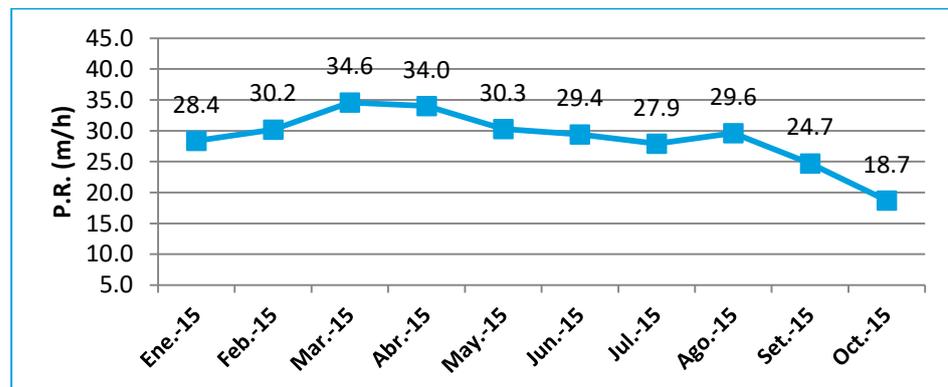


Figura 48.- Rangos de Penetración Mensuales 2015 (metros/hora).  
Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

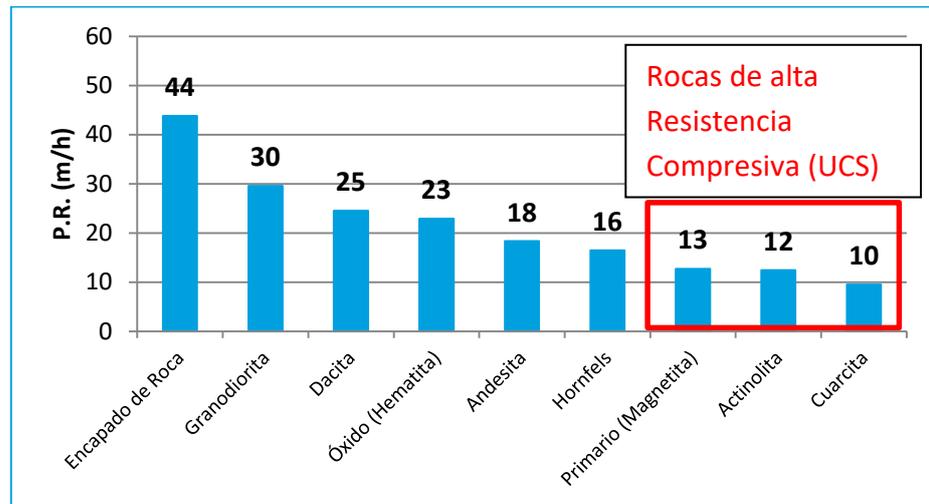


Figura 49.- Rangos de Penetración (m/h) Promedio 2015 por Tipo de Roca.

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

- Rendimiento Bruto:** Es la cantidad de producción que realiza una unidad productiva por hora de operación, la cual incluyen actividades no productivas con motor encendido, sin contar horas motor en mantenimiento, ver **Figura 50**.

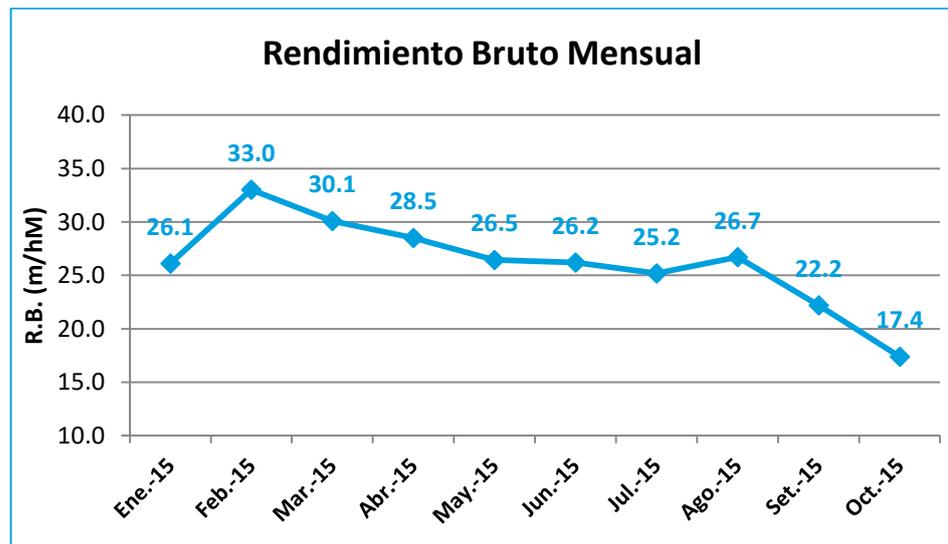


Figura 50.- Rendimientos Brutos Mensuales 2015 (m/hM).

Fuente: Productividad, COSAPI MINERÍA.

### 3.2.7. Mantenimiento de Equipos

Su objetivo es garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos requeridos por la operación.

Asimismo, conservar y administrar dichos equipos a una condición que le permita cumplir con las funciones, dentro de un marco económico óptimo y de acuerdo a las normas técnicas y procedimientos de seguridad y medio ambiente establecidos.

#### 3.2.7.1. Indicadores de Gestión de Mantenimiento

- **Disponibilidad Mecánica de Perforadoras**

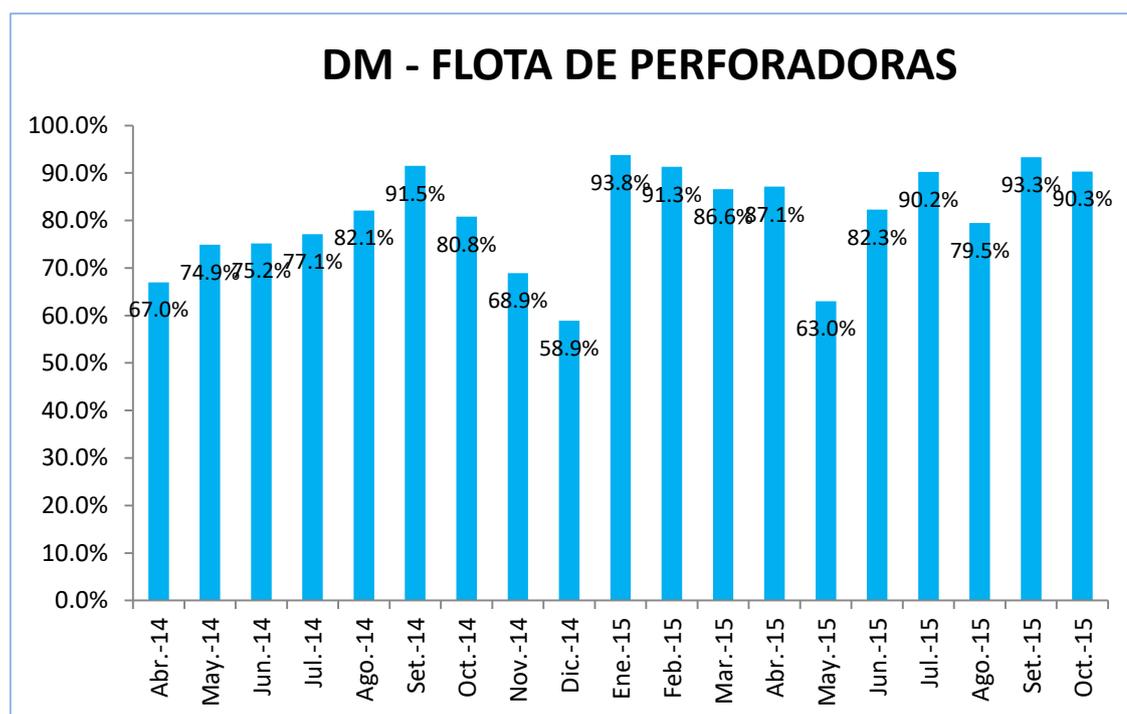


Figura 51.- Disponibilidad Mecánica de Perforadoras Rotativas en la Etapa I.

Fuente: Mantenimiento, COSAPI MINERÍA.

De acuerdo a las horas de operación que ha tenido la flota de perforadoras, desde las fechas indicadas, tienen un tiempo medio entre fallas promedio de **35,5** horas, ver **Figura 52**.

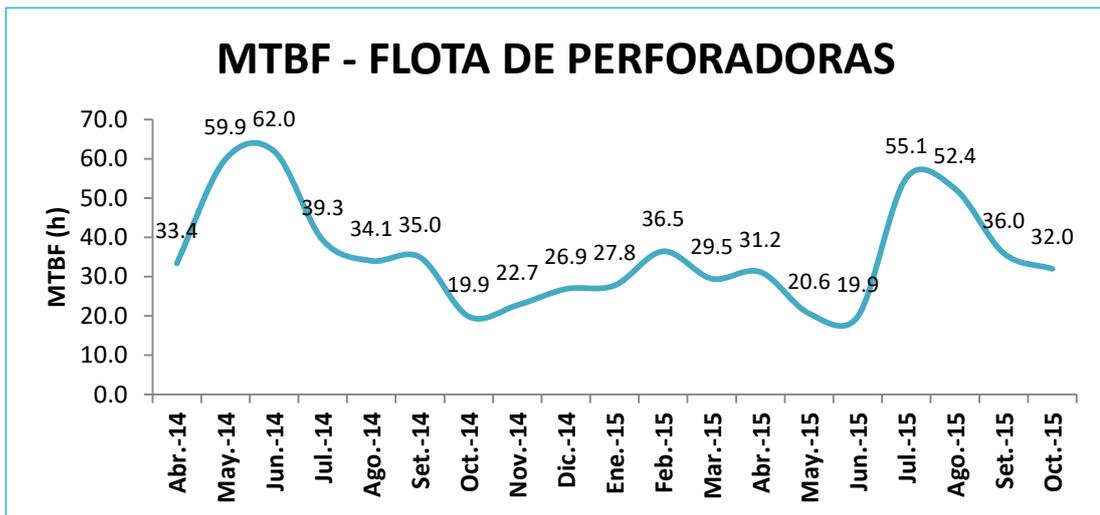


Figura 52.- Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) en Etapa I.

Fuente: Mantenimiento, COSAPI MINERÍA.

De acuerdo a las horas de operación que ha tenido la flota de perforadoras desde las fechas indicadas tiene un tiempo medio entre fallas promedio de **6,1** horas, ver **Figura 53**.

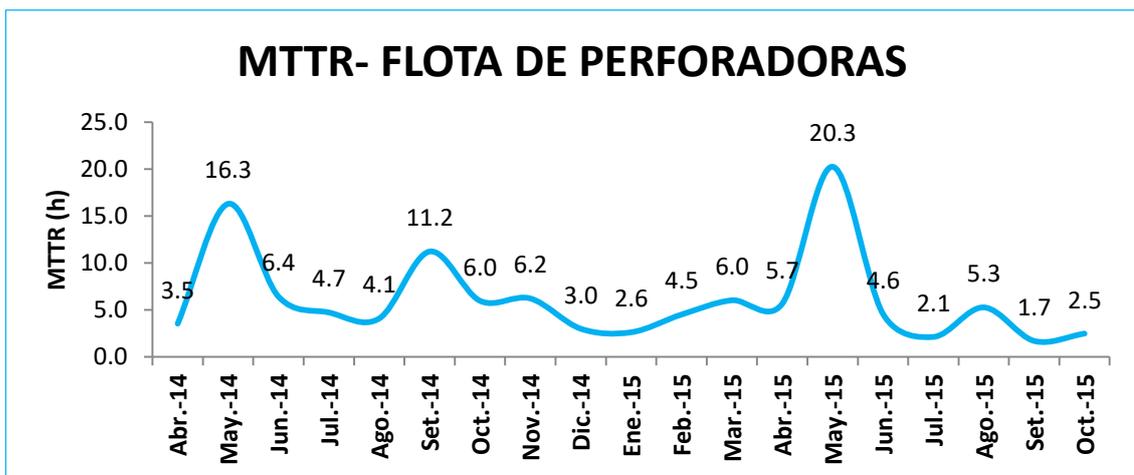


Figura 53.- Tiempo Medio para Reparaciones (MTTR) en Etapa I.

Fuente: Mantenimiento, COSAPI MINERÍA.

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN**

**4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**4.1.1. Definición de Variables**

Con el fin de establecer y demostrar la mejora del proceso de perforación, se definen las constantes, variables, funciones e indicadores que intervienen en el análisis.

*Tabla 15.- Sistema y Variables de Perforación.*

INDICADORES	Costo unitario de perforación (\$/t)					
					Productividad (t/h)	
	TDC (\$/m)- Total Drilling Cost					
FUNCIONES	LOB (m)	COB (\$)	O&O (\$/h)	PR (m/hN)	Eff (%)	FP (t/m)
VARIABLES	PD (psi) Rot (RPM) Broca (abc) UCS (psi)	Fab. (x) Broca (abc)	M (\$/h)	W (lbs.) UCS (psi) Rot (RPM)	DF (%) U (%) Eca (%)	B (m) S (m) D (t/m <sup>3</sup> )
CONSTANTES	BV (fpm)		MO (\$/h) E (\$/h)	BV (fpm) ø (pulg.)		H (m) SD (m)

*Fuente: Elaboración propia.*

En la **Tabla 15**, se muestran los supuestos del análisis, definidos como valores constantes como la velocidad de barrido (BV), diámetro de taladro ( $\emptyset$ ), altura de banco (H), etc. que normalmente varían en una operación, pero en el caso del estudio se mantendrá como constantes, para un mejor entendimiento y enfoque del objetivo.

Para entender los indicadores, funciones, variables y constantes que intervienen en el sistema, se utilizará un cuadro resumen, **Tabla 16**, en el cual se muestran los códigos, nomenclaturas, unidades de medida y fórmulas de cálculo o valores constantes.

Tabla 16.- Cálculo de Variables del Sistema de Perforación.

Tipo	Código	Nomenclatura	Unidad	Fórmula de cálculo
INDICADOR	CUP	Costo Unitario de Perforación	\$/t	TDC/FP
	PRD	Productividad de perforación	t/h	PR.FP.Eff
	TDC	<i>Total Drilling Cost</i>	\$/m	(O&O Cost)/(Eff.PR) + COB/LOB
FUNCION	O&O Cost	<i>Owning &amp; Operating Cost</i> (Costo de propiedad y operación)	\$/h	M + MO + E
	LOB	<i>Life Of Bit</i> (Vida útil de broca tricónica)	M	Función (PD, RPM, Broca, UCS, BV)
	COB	<i>Cost Of Bit</i> (Costo de broca tricónica/barrenos)	M	Función (Fabricante, Broca)
	PR	<i>Penetration Rate</i> (Rango de penetración)	m/h	(a-b.Log UCS).(W/°).(RPM/300)
	FP	Factor de Perforabilidad	t/m	B.E.(H-SD).D/H
	Eff	Eficiencia	%	DF.U.Eca
VARIABLE	UCS	Resistencia compresiva uniaxial	psi	Ensayos de mecánica de rocas
	PD	<i>Pulldown</i> (Presión sobre la broca)	psi	Depende del tipo de roca
	RPM	Velocidad de rotación	RPM	Depende del tipo de roca
	Broca	Broca tricónica	abc	Código IADC
	M	Materiales	\$/h	Barrenos (-Broca) + Agua + Otros
	W	Peso sobre la broca	Lbs	Depende del tipo de roca
	B	Burden	M	Depende del tipo de roca
	S	Espaciamiento	M	Depende del tipo de roca
	D	Densidad del material	t/m <sup>3</sup>	Depende del tipo de roca
	DF	Disponibilidad Física	%	(H progr. -H mantto)/H progr.
	U	Utilización	%	H brutas /(H progr. -H mantto)
Eca	Eficacia	%	H netas / H brutas	
CONSTANTE	BV	<i>Bailing velocity</i> (Barrido)	Fpm	Necesario para correcto barrido
	MO	Mano de obra	\$/h	Supervisor + Operador + Ayudante
	E	Equipo	\$/h	Costo de propiedad + herramientas
	Ø	Diámetro de perforación	Pulg.	12 1/4"
	H	Altura de perforación	M	15 metros banco + SD
	SD	<i>Subdrilling</i>	M	1.5 metros

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.1. Flujograma de Variables

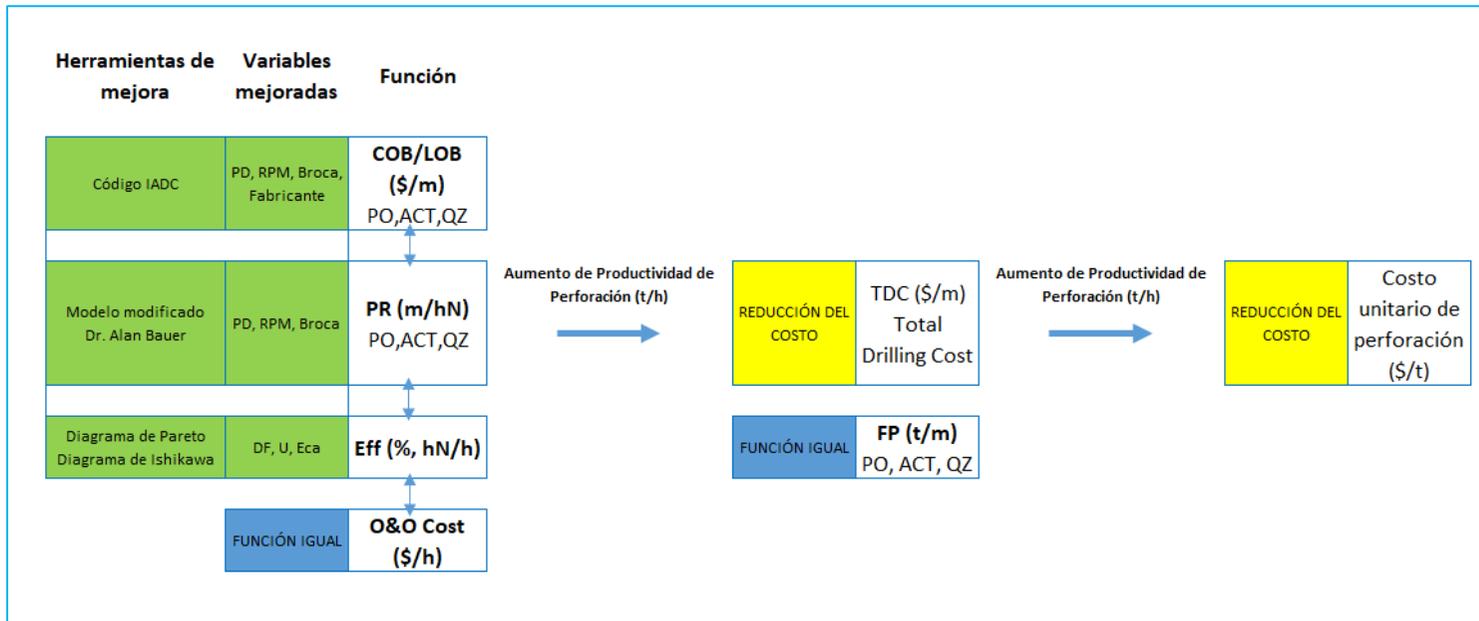


Figura 54.- Diagrama de Flujo del Procedimiento de Mejora de Variables para la Reducción de Costos de Perforación.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 54**, se aprecia el flujograma de los factores para realizar la mejora de las siguientes funciones:

- Costo y vida de la broca tricónica.
- Rango de penetración.
- Eficiencia de perforación.

Asimismo, la función que define al **Factor de perforabilidad** se mantendrá constante para el cálculo de los resultados en el proceso de mejora. La función **O&O Cost** únicamente varía debido al costo variable del equipo de perforación, el cual depende de las horas máquina consumidas.

Cabe resaltar, también, que las variables a mejorar en el proceso de perforación son las siguientes:

- Selección del tipo y fabricante de brocas tricónicas.
- Variables operativas de perforación (PD, RPM).
- Disponibilidad física, utilización y eficacia.

Utilizando las siguientes herramientas:

- Código IADC para brocas tricónicas.
- Modelo matemático modificado del PhD. Alan Bauer.
- Diagrama de Pareto.
- Gráficas de tendencias.

#### 4.1.1.2. Definición de Funciones Constantes (O&O Cost, FP)

Las funciones que se mantendrán como factores constantes para el cálculo de los resultados de mejora son el **Factor de Perforabilidad (FP)** y **los Costos de propiedad y operación de la perforadora (O&O Cost)**.

- **Factor de Perforabilidad (t/m)**

Su cálculo depende del tipo de malla de perforación y densidad de la roca a perforar, ver

**Tabla 17.**

**Tabla 17.- Factores de Perforabilidad de Rocas de Alta Dureza Compresiva**

FACTOR DE PERFORABILIDAD POR TIPO DE ROCA									
Roca	Código	Malla de perforación (metros)				Ø (pulg.)	B=0,866xS	Densidades	FP (t/m)
		Espaciamiento	Burden	Banco	Subdrilling		Tipo de malla		
Primario	Po	5	4,33	15	1,5	12,25	Triangular	4,47	88,0
Actinolita	Act	5	4,33	15	1,5	12,25	Triangular	2,74	53,9
Cuarcita	Qz	4,5	3,90	15	1,5	12,25	Triangular	2,74	43,7

Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.

- **Owning & Operating Cost (\$/hM)**

Dentro de estos costos, consideramos los recursos de mano de obra, materiales y equipo, los cuales son indirectos al tipo de roca perforada, quiere decir que serán los mismos para los tres casos de evaluación: **PO, ACT y QZ**.

Estos costos serán indicados por unidad de tiempo cronológico (horas) en la **Tabla 18**, para calcular los costos que varían con el horómetro del equipo, se aplicará el factor de **Eficiencia del proceso (hM/h)**.

**Tabla 18.- Costos de Perforadora Sandvik 1190E.**

*h: hora cronológica, hM: hora máquina de perforadora.*

Costo Perforadora Sandvik 1190E	Costo Fijo (\$/h)	Costo Variable (\$/hM)	Total (\$/hM)
<b>Lubricación</b>	0.00	22.14	22.14
<b>Carrilería</b>	0.00	5.81	5.81
<b>Mantenimiento</b>	30.09	4.06	34.15
<b>Reparación mayor</b>	0.00	21.47	21.47
<b>Depreciación</b>	77.91	0.00	77.91
<b>Financiamiento</b>	19.95	0.00	19.95
<b>Seguro</b>	3.71	0.00	3.71
<b>Total Equipo</b>	131.65	53.48	185.13

Fuente: Costos, COSAPI MINERIA.

Por lo tanto, con los costos detallados de la perforadora y los demás recursos, se calcula el costo de propiedad y operación (**O&O Cost**) en la siguiente **Tabla 19**:

**Tabla 19.- Costo de Propiedad y Operación de Perforación en el 2015.**

<b>Owning &amp; Operating Cost (\$/h)</b>						
<b>Descripción</b>	<b>Und</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Rend Recurso</b>	<b>Costo Recurso</b>	<b>C.Unitario (\$/h.)</b>	<b>C. Total (\$)</b>
<b>MATERIALES</b>						
Alimentación	mes	3	720	188,24	0,78	564,71
Alojamiento	mes	3	720	235,29	0,98	705,88
Implementos de Seguridad	mes	3	720	92,20	0,38	276,60
Examen Medico	mes	3	720	9,63	0,04	28,88
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>2,19</b>	<b>1 576,07</b>
<b>MANO DE OBRA</b>						
Supervisor de Perforación	mes	1	720	3 326,50	4,62	3 326,50
Operador Perforadora	mes	1	720	2 515,50	3,49	2 515,50
Ayudante Perforadora	mes	1	720	926,70	1,29	926,70
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>9,40</b>	<b>6 768,70</b>
<b>EQUIPOS</b>						
Perforadora Sandvik 1190E costo fijo	h	1,00	1,00	<b>131,65</b>	131,65	94 789,54
Perforadora Sandvik 1190E costo variable	hM	1,00	0,64	<b>53,48</b>	34,40	24 766,59
<b>TOTAL EQUIPOS</b>					<b>166,05</b>	<b>119 556,13</b>
<b>O&amp;O Cost</b>	<b>\$/h</b>				<b>177,64</b>	<b>127 900,89</b>

Fuente: Costos, COSAPI MINERIA.

#### 4.1.2.Productividad Obtenida (Eff, PR, FP)

La perforación como todo proceso, ingresa a un círculo de mejora continua, que es necesario verificar mediante la toma de datos, en campo, definiendo indicadores. Un indicador muy importante para conocer la realidad en el proceso de perforación es su Productividad, la cual se expresa cuantitativamente en **Toneladas Métricas Perforadas (t)** respecto a las **horas cronológicas (h)**.

La Productividad, sabemos, que depende de tres funciones, el **Rango de penetración (m/h)**, la **Eficiencia (%)** y el **Factor de Perforabilidad (t/m)**.

En la **Tabla 20**, se muestra la **Eficiencia de perforación** rotativa del año 2015, perforadoras eléctricas Sandvik 1190E:

**Tabla 20.- Eficiencia de Perforación 2015**

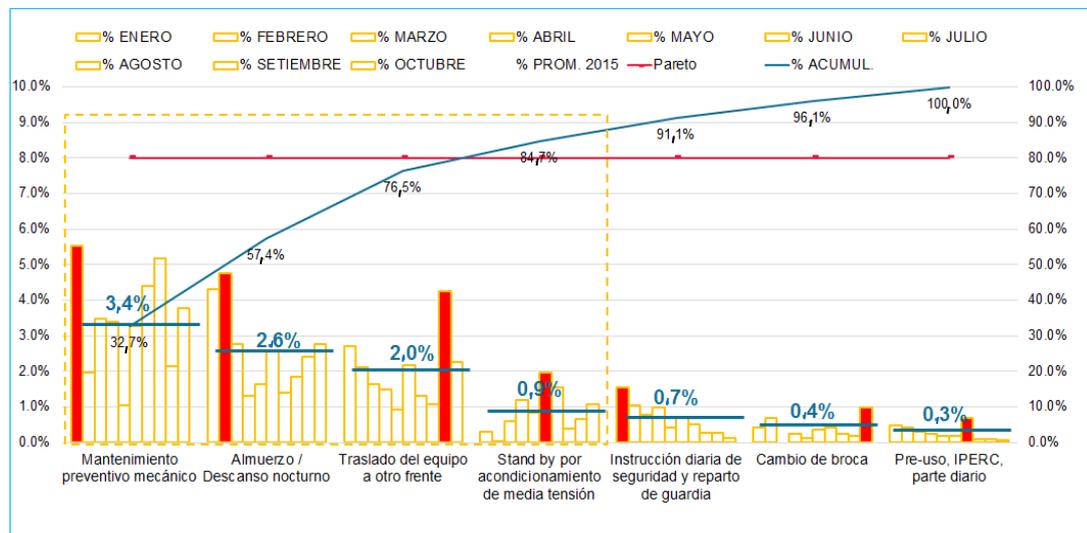
*hN: horas netas, hM: horas máquina, h: horas cronológicas*

Resultados obtenidos 2015	Perforadoras 1190E
Disponibilidad Física (DF)	80,0%
Utilización (UT)	80,4%
Eficacia (Eca)	89,6%
Eficiencia (Eff = DFxUTxEca)	57,6%
Horas netas por Guardia (hN/h)	6,9 <b>(57,6% de 12h)</b>
Horas Contributorias por Guardia	1,6 <b>(13,3% de 12h)</b>
Horas No Contributorias por Guardia	3,5 <b>(29,1% de 12h)</b>

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.**

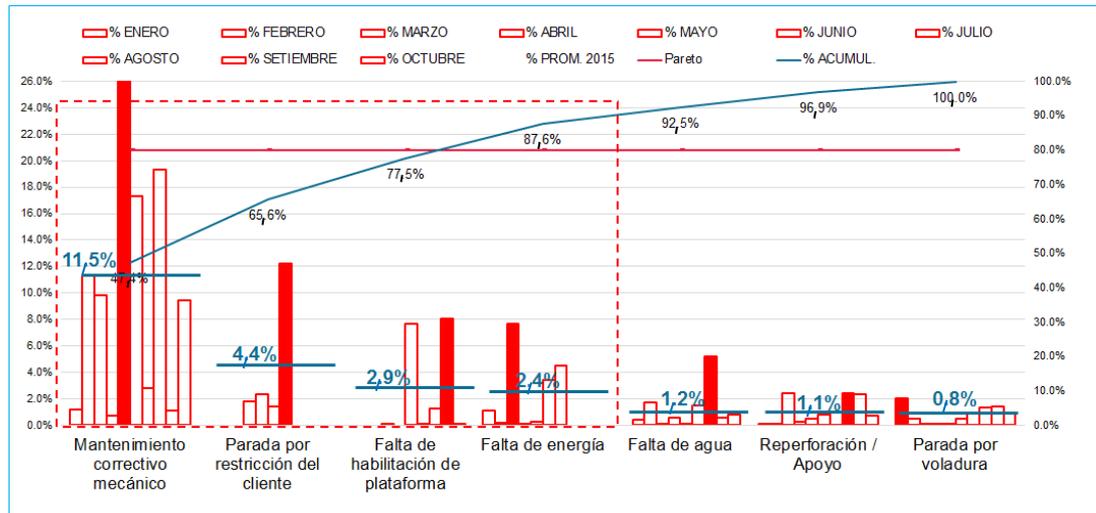
Como se observa en la **Tabla 20**, existen en total **5,1 horas improductivas** (1,6 horas contributorias y 3,5 horas no contributorias) dentro de un turno de 12 horas.

Estas horas están disgregadas, según afectación, en los siguientes diagramas de Pareto mostrados en las **Figuras 55 y 56**:



**Figura 55.- Actividades Contributorias (1,6 horas – 13,3% de 12h).**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.**



**Figura 56.- Actividades No Contributivas (3,5 horas – 29,1% de 12h).**

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.**

Por lo tanto, con los resultados de eficiencia, rango de penetración y factor de perforabilidad, para rocas de alta resistencia compresiva, se procede al cálculo de la productividad de perforación, en la **Tabla 21**:

**Tabla 21.- Productividad en el año 2015 de Rocas de Alta Resistencia Compresiva (PO, ACT, QZ).**

Factor de Productividad	Unidad	PO	ACT	QZ
Rango de penetración	m/hN	13	12	10
Rendimiento Bruto	m/hM	11,6	10,8	9,0
Factor Perforabilidad	t/m	88	54	44
Eficacia	%	89,6%	89,6%	89,6%
Eficiencia	%	57,6%	57,6%	57,6%
Horas netas	hN	13,8	13,8	13,8
Horas máquina	hM	15,4	15,4	15,4
Productividad	t/h	<b>659</b>	<b>373</b>	<b>252</b>
Producción mensual	T	474 573	268 524	181 254
Metros perforados mensual	m	5 394	4 979	4 149

**Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.**

#### 4.1.3. Vida Útil Obtenida en Barrenos de Perforación

En la **Tabla 22**, se muestra la estimación de la vida útil promedio de los barrenos de perforación, sin incluir las brocas tricónicas, debido a que más adelante, se realizará un análisis más detallado por material perforado por tipo de broca.

**Tabla 22.- Vida Útil y Costo de Barrenos de Perforación en Rocas de Alta Resistencia Compresiva (PO, ACT y QZ).**

Tipo de Barreno	UM	Costo(\$)	Vida útil prom.(m)	Costo barreno (\$/m)
Adaptador Superior (Top Sub) 9.1/4" x 30"	UND	1 354,87	30 988,00	0,04
Adaptador Inferior (Bit Sub) 9.1/4" x 42"	UND	2 629,94	14 081,00	0,19
Anillo Centralizador (Deck Bushing) 9.1/4"	UND	3 288,79	19 367,00	0,17
Barra de Perforación 9.1/4" x 20'	UND	5 229,04	18 111,00	0,29
Barra de Perforación 9.1/4" x 40'	UND	7 858,32	23 215,00	0,34
Shock Absorber	UND	28 945,28	23 419,00	1,24
<b>SUBTOTAL BARRENOS DE PERFORACIÓN</b>				<b>2,26</b>

Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.

Respecto a las brocas tricónicas, se muestra en la **Tabla 23**, el consumo realizado en el año 2015 para rocas de alta resistencia compresiva (PO, ACT, QZ), teniendo en cuenta que la broca tricónica más utilizada fue del fabricante **PDB Tools, código IADC 722**:

**Tabla 23.- Brocas Tricónicas Consumidas en el Año 2015**

CONSUMO DE BROCAS TRICÓNICAS 2015				
FABRICANTE	TIPO	MODELO	HILO	CANTIDAD
PDB	642	-	API	<b>5</b>
PDB	722	GX	API	<b>15</b>
SANDVIK	722	S40	API	<b>1</b>
SHAREATE	732	-	API	<b>2</b>

Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.

Los resultados de la estimación de la vida útil de las brocas tricónicas **PDB GX 722**, obtenidos en el año 2015, fueron recopilados y promediados para poder obtener un rendimiento promedio en perforación de rocas de alta resistencia compresiva, ver **Tabla 24**.

**Tabla 24.- Vida Útil de Brocas Tricónicas**

	Brocas tricónicas	
	Material	Vida útil (m)
<b>PDB GX 722</b>	<b>PO</b>	829
	<b>ACT</b>	715
	<b>QZ</b>	519
<b>Diversas Brocas</b>	<b>ER</b>	1844
	<b>OX</b>	2049

Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.

Por lo tanto, el costo de brocas tricónicas obtenidas en el año 2015, son las siguientes:

**Tabla 25.- Costo por Metro Perforado de Brocas Tricónicas PDB GX 722 por Tipo de Material Perforado (PO, ACT, QZ).**

Material perforado	UM	Costo(\$)	Vida útil prom.(m)	Costo broca (\$/m)
Broca Tricónica 12.1/4" PO	UND	4,153.15	829.00	5.01
Broca Tricónica 12.1/4" ACT	UND	4,153.15	715.00	5.81
Broca Tricónica 12.1/4" QZ	UND	4,153.15	519.00	8.00

Fuente: P&V, COSAPI MINERIA.

#### 4.1.4. Costo de Perforación Obtenida (\$/m, \$/t)

Con la información de **Productividad (t/h)**, **O&O Cost (\$/h)**, **Factor de Perforabilidad (t/m)** y Costo de barrenos de perforación (**COB y LOB**); se procede a calcular el **Total Drilling Cost (TDC) en \$/m**, y para relacionar este valor con el costo total de minado, calculamos el **Costo unitario de perforación (CUP) en \$/t**.

Estos indicadores, obtenidos en la perforación rotativa del año 2015, se calcularán para los tres tipos de roca de alta resistencia compresiva, **Primario (PO)**, **Actinolita (ACT)** y **Cuarcita (QZ)**, ver **Tabla 26**.

Tabla 26.- Total Drilling Cost - TDC (\$/m) y Costo Unitario de Perforación – CUP (\$/t)

Total Drilling Cost PO (\$/m)						
Descripción	Und	Cantidad	Rend Recurso	Costo Recurso	C.Unitario (\$/m)	CUP (\$/t)
<b>BARRENOS DE PERFORACIÓN</b>						
Barrenos de perforación	m.	1	1	2,26	2,26	0,03
Broca Tricónica	m.	1	1	5,01	5,01	0,06
<b>TOTAL BARRENOS</b>					<b>7,27</b>	<b>0,08</b>
<b>PERFORACIÓN</b>						
O & O Cost	\$/h	1	7,49	177,64	23,71	0,27
<b>TOTAL PERFORACIÓN</b>					<b>23,71</b>	<b>0,27</b>
<b>TDC (\$/m)</b>	\$/m				<b>30,98</b>	
<b>CUP (\$/t)</b>	\$/t					<b>0,35</b>
<b>Total Drilling Cost ACT (\$/m)</b>						
Descripción	Und	Cantidad	Rend Recurso	Costo Recurso	C.Unitario (\$/m)	CUP (\$/t)
<b>BARRENOS DE PERFORACIÓN</b>						
Barrenos de perforación	m.	1	1	2,26	2,26	0,04
Broca Tricónica	m.	1	1	5,81	5,81	0,11
<b>TOTAL BARRENOS</b>					<b>8,07</b>	<b>0,15</b>
<b>PERFORACIÓN</b>						
O & O Cost	\$/h	1	6,92	177,64	25,69	0,48
<b>TOTAL PERFORACIÓN</b>					<b>25,69</b>	<b>0,48</b>
<b>TDC (\$/m)</b>	\$/m				<b>33,76</b>	
<b>CUP (\$/t)</b>	\$/t					<b>0,63</b>
<b>Total Drilling Cost QZ (\$/m)</b>						
Descripción	Und	Cantidad	Rend Recurso	Costo Recurso	C.Unitario (\$/m)	CUP (\$/t)
<b>BARRENOS DE PERFORACIÓN</b>						
Barrenos de perforación	m.	1	1	2,26	2,26	0,05
Broca Tricónica	m.	1	1	8,00	8,00	0,18
<b>TOTAL BARRENOS</b>					<b>10,27</b>	<b>0,24</b>
<b>PERFORACIÓN</b>						
O & O Cost	\$/h	1	5,76	177,64	30,82	0,71
<b>TOTAL PERFORACIÓN</b>					<b>30,82</b>	<b>0,71</b>
<b>TDC (\$/m)</b>	\$/m				<b>41,09</b>	
<b>CUP (\$/t)</b>	\$/t					<b>0,94</b>

Fuente: Costos, COSAPI MINERIA.

## 4.2. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.2.1. Mejora de la Eficiencia de Perforación

Debido a las actividades improductivas mostradas anteriormente, se observa la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso.

El plan de acción se muestra a continuación en la **Tabla 27**:

**Tabla 27.- Plan de Acción para Reducir Horas Improductivas**

Actividad Improductiva	Acción correctiva/preventiva	Mejora en Kpi's
Reperforación de taladros.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controlar el estado y diseño de los taladros de perforación (Uso de aditivos).</li> <li>- Mejorar la calidad de los taladros perforados (Control de alturas, espaciamiento entre taladros, etc).</li> </ul>	Aumento de la Eficacia.
Espera del equipo por falta de agua para perforación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de los niveles de agua de las perforadoras, gestionando el tiempo eficientemente de las cisternas de agua para el abastecimiento oportuno.</li> <li>- Uso de contenedores de agua dulce para su almacenamiento dentro de mina.</li> </ul>	Aumento de la Utilización
Traslados y paradas por voladura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control insitu de traslados y paradas de los equipos por voladura.</li> <li>- Minimizar la frecuencia de disparos.</li> <li>- Colocar estacas topográficas en un radio de influencia de la voladura de 300 metros para salida de equipos.</li> </ul>	Aumento de la Utilización y Eficacia
Reparto de guardia, Pre- uso, IPERC y almuerzo	Organizar los relevos en cambios de guardia, cambios en caliente, almuerzo y descansos nocturnos	Aumento de la Utilización
Traslado del equipo a otro frente (entre filas, proyectos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controlar la secuencia de perforación taladro a taladro.</li> <li>- Planificar los traslados entre proyectos.</li> <li>- Habilitar los proyectos de perforación anticipadamente.</li> </ul>	Aumento de la Eficacia
Acondicionamiento media tensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminuir la frecuencia de traslados largos de las perforadoras.</li> <li>- Planificar los traslados largos para anticipar trabajos previos.</li> </ul>	Aumento de la Disponibilidad física

**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.2.2. Aplicación para Mejorar la Eficiencia

Reducción de horas en actividades contributorias y no contributorias, ver **Tablas 28, 29 y**

**30:**

**Tabla 28.- Mejora Cuantificada de las Actividades Improductivas del año 2017 respecto al 2015.**

Actividad afectada por falta de control	Tipo	% Total	Guardia (h)	% Mejora	Guardia* (h)	Efecto	Mejora (h)
Traslado del equipo a otro frente (entre filas, proyectos).	Contributorias	2,0%	0,24	40,0%	0,14	Eficacia	0,10
Almuerzo/descanso nocturno.		2,6%	0,31	15,4%	0,26	Utilización	0,05
Acondicionamiento media tensión.		0,9%	0,11	33,3%	0,07	Disponibilidad	0,04
Reparto de guardia.		0,7%	0,08	57,1%	0,04	Utilización	0,05
Pre-uso, IPERC.		0,3%	0,04	33,3%	0,02	Utilización	0,01
<b>Subtotal</b>		<b>6,5%</b>	<b>0,78</b>	<b>30,8%</b>	<b>0,54</b>	<b>Productividad</b>	<b>0,24</b>
Falta de habilitación de plataforma.	No Contributorias	2,9%	0,35	82,8%	0,06	Utilización	0,29
Falta de agua.		1,2%	0,14	91,7%	0,01	Utilización	0,13
Reperforación/ apoyo.		1,1%	0,13	18,2%	0,11	Eficacia	0,02
Parada por voladura.		0,8%	0,10	25,0%	0,07	Utilización	0,02
<b>Subtotal</b>		<b>6,0%</b>	<b>0,72</b>	<b>65,0%</b>	<b>0,25</b>	<b>Productividad</b>	<b>0,47</b>
<b>Total</b>							<b>0,71</b>

\* Duración promedio de la actividad improductiva después de su mejora

Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.

**Tabla 29.- Reducción de Horas Improductivas por Tipo de Actividad.**

Actividad	2015	Mejora	2017
Mantenimiento (DF)	2,40	- 0,04	2,36
Parada (U)	1,88	- 0,55	1,33
Motor improductivo (Eca)	0,80	- 0,12	0,68
<b>Total (Eff)</b>	<b>5,08</b>	<b>- 0,71</b>	<b>4,38</b>

Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.

**Tabla 30.- Mejora en las Horas Improductivas de Perforación**

Actividad	Mejora	% Total
Mantenimiento (DF)	- 0,04	1,7 %
Parada (U)	- 0,55	29,2 %
Motor improductivo (Eca)	- 0,12	15,0 %
<b>Total (Eff)</b>	<b>- 0,71</b>	<b>14,0 %</b>

Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.

Con estas mejoras, los indicadores de eficiencia aumentan, teniendo una mayor productividad total en toneladas perforadas por hora, tal como se muestra en la **Tabla 31**:

**Tabla 31.- Cuadro Resumen de la Mejora de Indicadores de Eficiencia.**

Indicadores de Productividad	Antes de mejora Sandvik 1190E (2015)	Después de mejora Sandvik 1190E (2017)
Disponibilidad física	80,0%	80,3%
Utilización	80,4%	86,2%
Eficacia	89,6%	91,8%
Eficiencia	57,6%	63,5%
Horas netas por guardia	6,9	7,6
Minutos netos por Hora	35	38
Horas contributorias por guardia	1,6	1,4
Horas no contributorias por guardia	3,5	3,0

Fuente: Productividad, COSAPI MINERIA.

#### 4.2.3. Mejora de Variables Operacionales (PD, RPM)

##### 4.2.3.1. Estadística 2015 de Variables Operacionales

La información recopilada de las variables operacionales aplicadas en la perforación de taladros en el 2015, 140 taladros de muestra, son valores promedio que el operador de perforadora anota para cada tramo del taladro. Esta información se relaciona con el logueo del cono de perforación para saber el tipo de roca por tramo del taladro, ver **Tabla 32**.

**Tabla 32.- Rango de Penetración y Variables Operacionales Aplicadas en la Perforación Rotativa en el 2015.**

	Tipo de roca	PD (psi) min.	PD (psi) máx.	RPM min.	RPM máx.	PR (m/h)	N° muestras
	<b>GDD</b>	167	267	80	90	34,0	1
	<b>DAC</b>	300	300	70	70	27,7	1
	<b>OX</b>	167	333	80	90	26,1	2
	<b>HFS</b>	100	350	60	90	23,1	52
	<b>PA</b>	133	333	65	90	20,9	13
<b>Rocas de alta UCS</b>	<b>PO</b>	200	350	60	70	16,6	22
	<b>QZ</b>	167	383	60	90	14,6	38
	<b>ACT</b>	300	300	60	60	14,0	11
	<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>383</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>22.1</b>	<b>140</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3.2. Modelo Matemático del Ph.D Alan Bauer para Sandvik 1190E

El modelo matemático propuesto por Ph.D. Alan Bauer fue utilizado para Perforadoras rotativas Bucyrus Erie, en un yacimiento de hierro, como el de Marcona. Por ello, se vio la oportunidad de realizar una modificación y adecuarlo a las Perforadoras Sandvik 1190E.

La necesidad de realizar un modelo, el cual nos permita relacionar las variables operacionales (PD, RPM) y de la roca (UCS) con el rango de penetración (PR); es debido a que se necesita estimar este último valor (PR) para las futuras perforaciones de rocas de alta resistencia compresiva, tales como Cuarcita y Actinolita. Actualmente sólo se ha perforado mineral primario, óxido y desmonte en la segunda etapa, en el año 2017, pero se tienen perforaciones diamantinas en bancos inferiores de Cuarcita y Actinolita.

A continuación se muestra el modelo matemático a calcular:

$$PR = (a - b \times \text{Log UCS}) \cdot \left(\frac{W}{\Phi}\right) \cdot \left(\frac{RPM}{300}\right)$$

Donde:

<b>PR</b>	:	Rango de Penetración (pies/h)
<b>UCS</b>	:	Resistencia compresiva uniaxial (1000 de PSI)
<b>W</b>	:	Fuerza de Empuje (1000 de Libras)
$\Phi$	:	Diámetro del taladro (Pulgadas)
<b>RPM</b>	:	Velocidad de rotación (RPM)
<b>a y b</b>	:	Constantes de Perforadora y Geología del yacimiento

Del modelo anterior, la información del Rango de penetración, *Pulldown* y Velocidad de rotación, se obtuvo mediante el registro de estos parámetros operativos en campo por cada taladro perforado, Con el fin de calcular asimismo las constantes “a” y “b”.

#### 4.2.3.3. Sondajes y Muestreos Geotécnicos

Respecto a la resistencia compresiva uniaxial (UCS), se tiene como referencia los ensayos de mecánica de rocas, realizados de los sondajes diamantinos y muestreo de taludes en las minas de la fase de ampliación Marcona, **ANEXO 10**.

Este conocimiento geotécnico puntual, se pudo relacionar con las perforaciones rotativas de producción realizadas en el 2017, con las perforadoras eléctricas **Sandvik 1190E**, esto con el objetivo de calcular las constantes “a” y “b” del modelo matemático modificado del PhD. Alan Bauer por el método de **regresión lineal**, ver **Tabla 33**.

**Tabla 33.- Sondajes Diamantinos y Muestreo Geotécnico de Taludes en Puntos de Perforación Rotativa 2017.**

	ESTACIÓN GEOTÉCNICA (Perforación rotativa 2017)	ROCA	COD	UCS (Kpsi)	Ubicación mina			N° Perforadora
					Mina	Nivel	Proyecto	
<b>SONDAJES DIAMANTINOS</b>	PGT15-02 / M-1	Andesita	PA	9,4	14	725	82	4
	PGT15-04 / M-1	Magnetita	PO	11,7	14	725	32	2
	PGT15-04 / M-2	Actinolita	ACT	16,5	14	710	40	3
	PGT15-06 / M-1	Magnetita	PO	23,2	14	725	30	2 y 4
	PGT15-07 / M-1	Hornfels	HFS	2,6	14	725	31	4
<b>MUESTREO DE TALUDES</b>	EG-01 / M-1	Andesita	PA	14,8	14	740	4	3
	EG-07 / M-1	Hematita	OX	8,9	14	740	3	3
	EG-15 / M-1	Hornfels	HFS	10,0	14	740	10	3

**Fuente:** Planeamiento, COSAPI MINERIA.

Estos valores de UCS se relacionaron con los rangos de penetración (PR) y variables operacionales (PD, RPM) aplicadas en la perforación rotativa en esas mismas coordenadas, obteniendo la siguiente información, mostrada en la **Tabla 34**.

**Tabla 34.- Rango de Penetración (PR) y Variables Operacionales (PD, RPM) para Perforación Rotativa**

ESTACIÓN GEOTÉCNICA (Perforación rotativa 2017)	COD	UCS (Kpsi)	PR (m/hN)	PD (psi)	Rotación (RPM)
PGT15-02 / M-1	PA	9,4	27,07	370	80
PGT15-04 / M-1	PO	11,7	27,68	400	80
PGT15-04 / M-2	ACT	16,5	23,10	420	70
PGT15-06 / M-1	PO	23,2	21,90	450	70
PGT15-07 / M-1	HFS	2,6	42,05	300	90
EG-01 / M-1	PA	14,8	25,80	420	70
EG-07 / M-1	OX	8,9	30,32	350	80
EG-15 / M-1	HFS	10,0	27,30	380	80

**Fuente:** P&V, COSAPI MINERIA.

#### 4.2.3.4. Regresión Lineal de Variables Operacionales

Se procede con el cálculo de las constantes "a" y "b" del modelo modificado del Ph.D Alan Bauer por el método de regresión lineal, según las siguientes ecuaciones:

$$PR = (a - b \times \text{Log UCS}) \cdot \left(\frac{W}{\phi}\right) \cdot \left(\frac{RPM}{300}\right) \dots \dots \dots (I)$$

$$PR \cdot \left(\frac{\phi}{W}\right) \cdot \left(\frac{300}{RPM}\right) = a + b \times (-\text{Log UCS}) \dots \dots \dots (II)$$

Siendo:  $PD = \frac{W}{\phi^2}$  (Reemplazando en fórmula II)

$$PR \cdot \left(\frac{1}{PD \cdot \phi}\right) \cdot \left(\frac{300}{RPM}\right) = a + b \times (-\text{Log UCS})$$

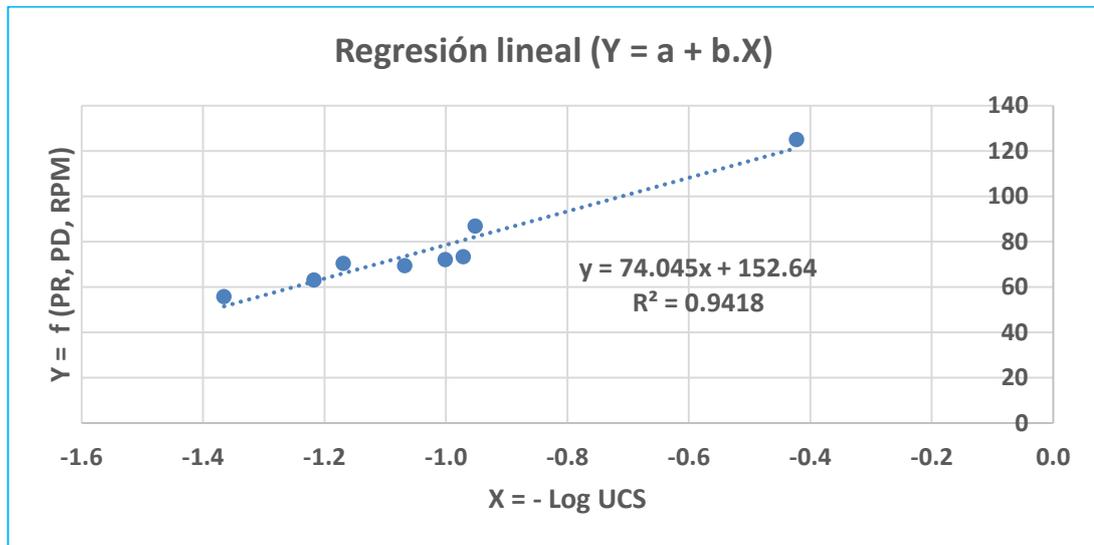
$$Y = \left(\frac{PR}{PD \cdot \phi}\right) \cdot \left(\frac{300}{RPM}\right), \quad X = -\text{Log UCS}$$

**Tabla 35.- Tabla de Cálculo de Variables de Regresión Lineal "X" y "Y" para obtener Constantes "a" y "b" del Modelo Matemático Modificado del Ph.D Alan Bauer.**

ESTACIÓN GEOTÉCNICA (Perforación rotativa 2017)	COD	UCS (Kpsi)	PR (m/hN)	PD (psi)	Rotación (RPM)	X = - Log UCS	Y = f (PR, PD, RPM)
PGT15-02 / M-1	PA	9,4	27,07	370	80	-0,97145	73,43529
PGT15-04 / M-1	PO	11,7	27,68	400	80	-1,06803	69,45108
PGT15-04 / M-2	ACT	16,5	23,10	420	70	-1,21748	63,08847
PGT15-06 / M-1	PO	23,2	21,90	450	70	-1,36549	55,83587
PGT15-07 / M-1	HFS	2,6	42,05	300	90	-0,42251	125,05111
EG-01 / M-1	PA	14,8	25,80	420	70	-1,16906	70,45594
EG-07 / M-1	OX	8,9	30,32	350	80	-0,95163	86,95148
EG-15 / M-1	HFS	10,0	27,30	380	80	-1,00109	72,10650

Fuente: *Elaboración propia*

Con estos valores de la **Tabla 35**, se realiza una gráfica en un eje cartesiano bidimensional, en una hoja de cálculo de *Microsoft Excel*. Luego se utiliza la opción graficar línea de tendencia lineal, obteniendo la **función lineal (Y = a + b.X)** y el **coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>)**, ver **Figura 57**.



**Figura 57.- Estimación de las Constantes del Modelo Modificado del PhD. Alan Bauer.**

**Fuente: Elaboración propia**

Mediante la gráfica de la **Figura 57**, se obtiene, según método de Regresión lineal, el modelo matemático modificado del PhD. Alan Bauer para la Perforadora Rotativa Sandvik 1190E, en el yacimiento de Marcona.

$$PR = (152,64 - 74,045 \times \text{Log UCS}) \cdot \left(\frac{W}{\Phi}\right) \cdot \left(\frac{RPM}{300}\right)$$

Según éste modelo modificado para nuestro equipo de perforación y yacimiento, se puede estimar los rangos de penetración como resultado del tipo de litología a perforar y variables operativas aplicadas.

#### 4.2.3.5. Control de Variables Operacionales (PD, RPM)

Las variables operacionales **Pulldown** (PD), presión sobre la roca, y **velocidad de rotación** (RPM) son las que determinan nuestro **rango de penetración** (PR) en el proceso de perforación de rocas, con una determinada resistencia compresiva uniaxial.

Dentro de la experiencia y conocimiento de las perforadoras eléctricas 1190E, se ha realizado una tabla estándar de las variables operacionales promedio que se deben aplicar

para obtener un resultado favorable en el rango de penetración. Siendo estos datos los siguientes, ver **Tabla 36**.

**Tabla 36.- Variables Operacionales Promedio respecto a la Resistencia Compresiva**

Resistencia	Resistencia (Kpsi)		Pulldown (psi)	Vel. Rotación (RPM)
	Kpsi	MPa		
Muy baja	0	0	300	90
Baja	5	34	350	80
Media	10	69	400	80
	15	103	500	70
Alta	20	138	550	70
	25	172	600	70
	30	207	650	60
Muy alta (Estimados)	35	241	700	60
	40	276	730	60
	45	310	760	60
	50	345	800	50
	55	379	850	50
	60	414	900	50

Fuente: *Elaboración propia.*

Estos valores de *Pulldown* en psi, requeridos para tener los mejores rangos de penetración en m/h, dependen del diámetro de perforación ( $\varnothing$ , pulg.) y el peso ejercido por la columna de perforación sobre la broca (W, en libras).

En el caso de la perforadora **Sandvik 1190E**, sus rangos de penetración estimados con el modelo matemático, para diferentes diámetros de perforación y con las variables operacionales recomendadas, se muestran en la **Tabla 37**.

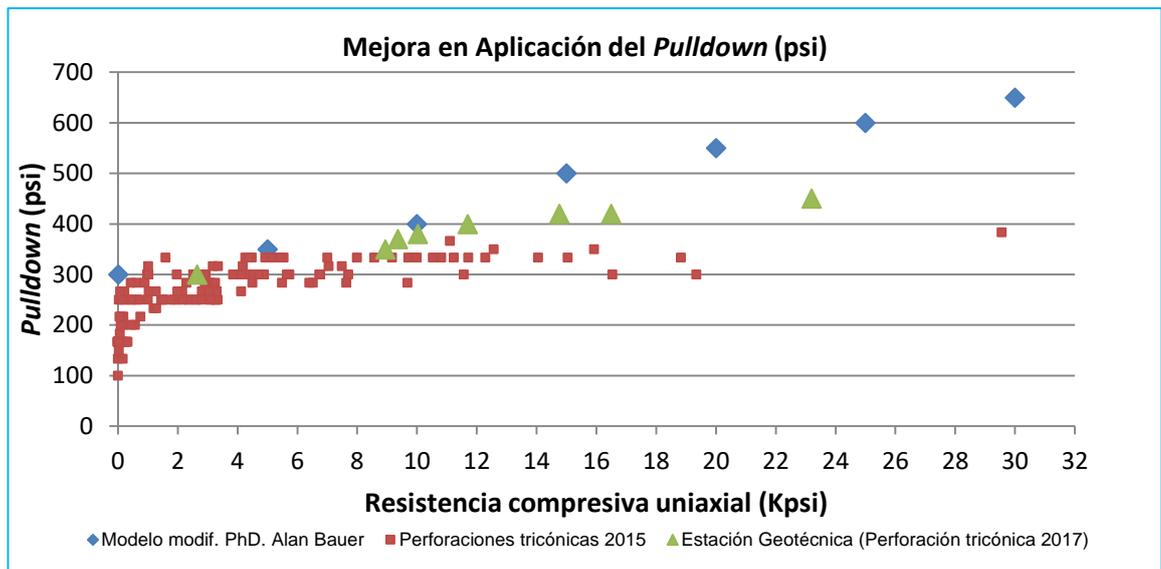
**Tabla 37.- Tabla de Rangos de Penetración para la Perforadora Sandvik 1190E, Calculados por el Modelo Matemático Modificado del PhD. Alan Bauer.**

Modelo modif. PhD. Alan Bauer																	
Resistencia	Resistencia (Kpsi)		Pulldown	RPM	Diámetros de Perforación (φ = Pulgadas)												
	Kpsi	MPa			17,52	15,98	15,00	13,74	12,24	10,63	9,88	9,02	7,87	7,36	6,73	6,14	
Muy baja	0	0	300	90	144,63	131,95	123,83	113,43	101,08	87,75	81,58	74,43	65,00	60,78	55,58	50,70	
Baja	5	34	350	80		45,90	43,08	39,46	35,16	30,53	28,38	25,89	22,61	21,14	19,33	17,64	
Media	10	69	400	80				35,13	31,31	27,18	25,27	23,05	20,13	18,82	17,21	15,70	
	15	103	500	70				32,05	28,56	24,80	23,05	21,03	18,37	17,17	15,70	14,33	
Alta	20	138	550	70					26,98	23,43	21,78	19,87	17,35	16,23	14,84	13,54	
	25	172	600	70					21,83	22,30	20,73	18,91	16,52	15,44	14,12	12,88	
	30	207	650	60					16,48	18,24	16,95	15,47	13,51	12,63	11,55	10,54	
Muy alta	35	241	700	60					14,59	17,39	16,16	14,75	12,88	12,04	11,01	10,05	
	40	276	730	60					12,96		14,97	13,66	11,93	11,15	10,20	9,30	
	45	310	760	60					11,51		13,85	12,63	11,03	10,32	9,43	8,61	
	50	345	800	50					8,52		10,79	9,84	8,59	8,04	7,35	6,70	
	55	379	850	50					7,55			9,26	8,09	7,56	6,92	6,31	
60	414	900	50					6,66			8,65	7,56	7,07	6,46	5,89		
Peso Máx Operativo (90,000 Lbs) 85% Eff		76,500				250	300	340	410	510	680	780	940	1230	1410	1690	2030
Valores de Pulldown (psi) máximos para diferentes diámetros de perforación																	

Fuente: Elaboración propia.

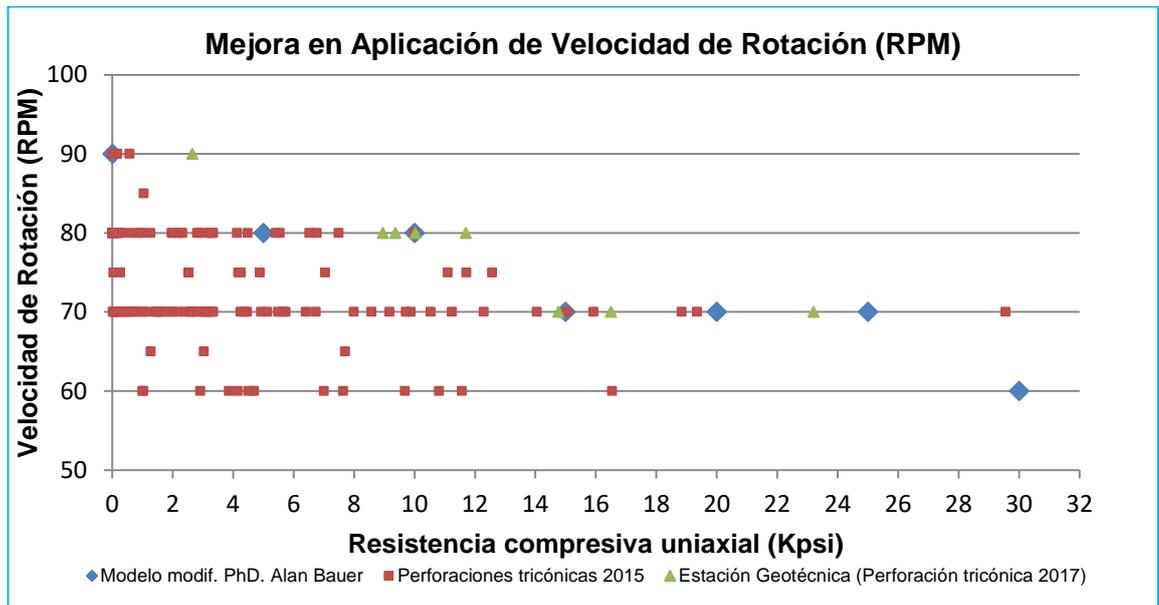
Se deduce claramente que, la perforadora **Sandvik 1190E**, está limitada a un *pulldown* de 510 psi y sus resultados en rangos de penetración de rocas con una resistencia compresiva mayores a 25,000 psi, estarán limitados.

Por lo tanto, teniendo las variables operacionales recomendadas para lograr el objetivo de mejorar los resultados del rango de penetración, se puso en práctica en el año 2017, una capacitación exhaustiva a los operadores de perforación, ver **Figura 58 y 59**.



**Figura 58.- Comparación entre la Variable Operacional Pulldown de las Perforaciones del 2015 y del 2017.**

**Fuente: Elaboración propia.**

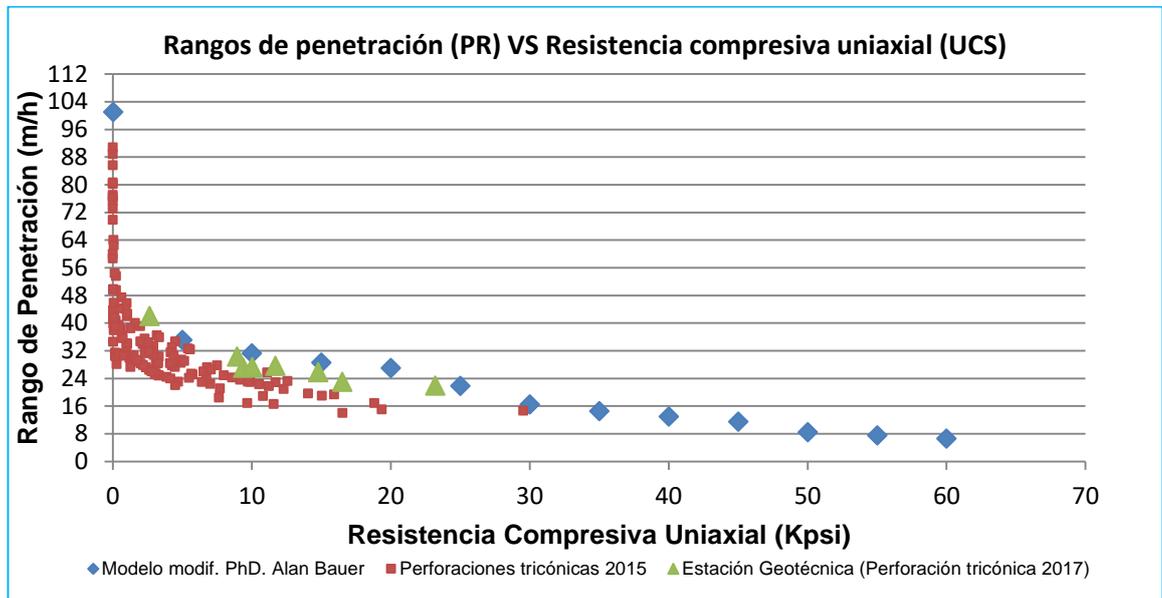


**Figura 59.- Comparación entre la Variable Operacional Velocidad de Rotación de las Perforaciones del 2015 y del 2017.**

**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.2.3.6. Mejora del Rango de Penetración (m/h)

Calculado el modelo matemático modificado y aplicado a las variables obtenidas en la perforación del 2015 para estimar sus resistencias compresivas; se compara el **Rango de penetración (m/h)** respecto a la **Resistencia Compresiva (psi)**, con el fin de demostrar la mejora del **PR**, debido a la aplicación correcta de las variables operacionales (**PD, RPM**), ver **Figura 60**.



**Figura 60.- Comparación de Rango de Penetración (PR) respecto a la Resistencia Compresiva (UCS) para las Perforaciones Rotativas del 2017 y 2015.**

**Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.2.4. Mejora en la Selección de Brocas Tricónicas**

Luego de mejorar la eficiencia del proceso, el control y ejecución de variables operacionales de perforación; se deben buscar opciones de brocas tricónicas y probarlas en campo, con el fin de seleccionar la que nos resulte menor el costo de perforación (TDC, CUP).

Como se detalló en el **Capítulo III**, la broca utilizada en el 2015 para rocas de alta resistencia compresiva, fue del fabricante **PDB Tools** con código **IADC 722**. En la segunda etapa se realizó la prueba con otros tres fabricantes, los resultados se muestran en la **Tabla 38**.

**Tabla 38.- Resultados de Prueba de Brocas Tricónicas para Diferentes Fabricantes en Rocas con Mineral**

**Primario (PO), Óxido (OX) y Desmorte (DESM).**

FABRICANTE	IADC	COB (\$)	LOB (m.)	PR (m/hN)	PO	OX	DESM	2xLOB(PO)=LOB(DESM,OX)	1.5xPR(PO)=PR(DESM,OX)
								LOB Equi. PO (m.)	PR Equi. PO (m/hN)
PDB (2015)	722	4000,00	1374,93	24,17	59%	5%	35%	578,41	15,77
SHAREATE (2017)	742	3560,00	2003,80	22,36	63%	6%	31%	915,37	16,06
MAMMOTH (2017)	742	3400,00	1997,98	28,48	49%	1%	50%	643,98	13,71
WLS (2017)	742	4291,14	1407,23	17,48	66%	0%	34%	693,11	13,73

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 39**, se muestra el número de brocas analizadas, para la comparación de fabricante cuyo resultado se indica en el **ANEXO 09**.

**Tabla 39.- Número de Brocas Analizadas para la Comparación de Fabricantes.**

FABRICANTE	IADC	Nº de brocas	Diámetro
PDB	722	9	12 1/4"
SHAREATE	742	7	12 1/4"
MAMMOTH	742	4	12 1/4"
WLS	742	3	12 1/4"

Fuente: Elaboración propia.

Como se especifica, muy aparte de realizar la prueba con otros fabricantes, también se seleccionó brocas con código **IADC 742**, esto debido a que las rocas que se van a perforar son de alta resistencia compresiva y los insertos de carburo de tungsteno deben tener la resistencia correcta para soportar los esfuerzos de este tipo de roca, ver **Tabla 40**.

**Tabla 40.- Cambio de Codificación IADC en Brocas Tricónicas para Rocas de Alta Resistencia Compresiva.**

	1er Dígito Sistema de Corte	2do Dígito Dureza	3er Dígito Sistema de rodamiento								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dientes de Acero	1 Dientes de acero para formación blanda	1 Suave	T	O	P	B	B	C	C	P	O
		2 Media Suave	O	B	R	A	A	H	H	A	A
		3 Media Dura	B	E	O	L	L	M	M	A	A
		4 Dura	R	R	T	E	E	A	A	C	C
	2 Dientes de acero para formación media	1 Suave	P	A	P	B	S	S	C	C	P
		2 Media Suave	A	I	R	E	S	S	C	C	A
		3 Media Dura	R	R	E	L	A	A	A	A	A
		4 Dura	A	R	E	L	L	L	L	L	L
	3 Dientes de acero para formación dura	1 Suave	L	O	L	O	A	A	L	L	L
		2 Media Suave	O	D	O	D	O	O	L	L	L
		3 Media Dura	Y	Y	C	A	L	L	L	L	L
		4 Dura	B	A	L	L	B	B	B	B	B
Dientes de insertos	4 Dientes de inserto para formación muy blanda	1 Suave	B	A	L	L	B	B	B	B	
		2 Media Suave	R	O	S	E	S	T	A	N	D
		3 Media Dura	E	S	T	A	N	D	A	R	
		4 Dura									
	5 Dientes de inserto para formación blanda	1 Suave									
		2 Media Suave									
		3 Media Dura									
		4 Dura									
	6 Dientes de inserto para formación media	1 Suave									
		2 Media Suave									
		3 Media Dura									
		4 Dura									
7 Dientes de inserto para formación dura	1 Suave										
	2 Media Suave										
	3 Media dura										
	4 Dura										
8 Dientes de inserto para formación extra dura	1 Suave										
	2 Media Suave										
	3 Media dura										
	4 Dura										

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados descritos en la prueba de perforación, de los 4 tipos de brocas tricónicas de diferentes fabricantes, se realiza la comparación y selección por medio de los indicadores de **Costos de perforación (TDC - \$/m y CUP - \$/t)**, según la **Tabla 41**.

**Tabla 41.- Selección de Broca Tricónica Mediante los Indicadores de Costo de Perforación (TDC y CUP).**

FABRICANTE	IADC	COB (\$)	LOB PO (m.)	PR. PO (m/hN)	Eff. (%)	O&O Cost (\$/h)	FP. PO (t/m)	TDC PO (\$/m)	CUP PO (\$/t)
PDB	722	4000,00	578,4	15,8	63,5%	180,24	88	27,18	0,309
SHAREATE	742	3560,00	915,4	16,1	63,5%	180,24	88	23,78	0,270
MAMMOTH	742	3400,00	644,0	13,7	63,5%	180,24	88	28,24	0,321
WLS	742	4291,14	693,1	13,7	63,5%	180,24	88	29,12	0,331

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, queda demostrado, por los resultados obtenidos, que la broca tricónica que nos da menores costos de perforación y mayor productividad es la **SHAREATE (IADC: 742)**. Esta broca tricónica es la que se utiliza para estimar la mejora en los indicadores de la perforación de rocas de alta resistencia compresiva uniaxial (PO, ACT y QZ).

### 4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

#### 4.3.1. Funciones y Variables de Perforación 2017 vs 2015

Comparación de valores obtenidos, después de la aplicación de mejoras en el proceso de perforación rotativa, con broca tricónica, ver en **Tabla 42**.

**Tabla 42.- Funciones y Variables que Intervienen para la Valorización de la Mejora en el Proceso de Perforación.**

Funciones/VARIABLES de Perforación	Unidad	PO 2015	ACT 2015	QZ 2015	PO 2017	ACT 2017	QZ 2017	Variación (%)
Rango de penetración	m/hN	13	12	10	16,1	14,9	12,4	23,8%
Factor de perforabilidad	t/m	88	54	44	88	54	44	0,0%
Eficiencia	%	57,6%	57,6%	57,6%	63,5%	63,5%	63,5%	10,2%
Productividad	t/h	659	373	252	899	509	344	36,5%
Producción mensual	t	474 573	268 524	181 254	647 597	366 426	247 337	36,5%
Metros perforados mensual	m	5 394	4 979	4 149	7 361	6 795	5 662	36,5%

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2. Costos de Perforación 2017 vs 2015

**Tabla 43.- Comparación de Costos de Propiedad y Operación de Perforación**

O&O Cost	Unidad	2015	2017	Variación (%)	Afectación (%)
TOTAL MATERIALES	\$/h	2.19	2.19	0%	1.2%
TOTAL MANO DE OBRA	\$/h	9.40	9.40	0%	5.3%
TOTAL EQUIPOS	\$/h	166.05	168.65	2%	93.5%
Total	\$/h	177.64	180.24	1%	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 44.- Costos de Perforación (TDC, CUP) por Tipo de Roca de Alta Resistencia Compresiva**

Total Drilling Cost (TDC)	Unidad	PO 2015	ACT 2015	QZ 2015	PO 2017	ACT 2017	QZ 2017	Variación (%)	Afectación (%)
Barrenos de perforación	\$/m	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	0,0%	7,3%
Broca tricónica	\$/m	5,01	5,81	8,00	3,89	4,51	6,21	-22,4%	17,9%
O & O Cost	\$/m	23,71	25,69	30,82	17,63	19,10	22,92	-25,6%	74,8%
Total	\$/m	30,98	33,76	41,09	23,78	25,87	31,39	-23,4%	100,0%
Costo Unitario de Perforación (CUP)	\$/t	0,35	0,63	0,94	0,27	0,48	0,72	-23,4%	-

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.3. Beneficios Alcanzados

Con las mejoras realizadas en la eficiencia del proceso, selección correcta de brocas tricónicas y aplicación de variables operacionales, según el tipo de roca a perforar; se demuestra en la **Tabla 45**, el incremento de la **Productividad (t/h)** y por consiguiente la reducción de los **Costos Unitarios de Perforación (\$/t)**:

**Tabla 45.- Beneficios Generados en la Perforación Rotativa con Broca Tricónica, especificando el Ahorro Mensual y Anual por tipo de Roca de Alta Resistencia Compresiva.**

	Var. (%) PROM	Variación		
		PO	ACT	QZ
CUP (\$/t)	-23,4%	-0,08	-0,15	-0,22
TDC (\$/m)	-23,4%	-7,20	-7,89	-9,70
COB/LOB (\$/m)	-22,4%	-1,12	-1,30	-1,79
O&O Cost (\$/m)	-25,6%	-6,08	-6,59	-7,91
<b>AHORRO MENSUAL (\$)</b>		<b>\$53 012,30</b>	<b>\$53 591,83</b>	<b>\$54 898,85</b>
<b>AHORRO ANUAL (\$)</b>		<b>\$636 147,60</b>	<b>\$643 101,97</b>	<b>\$658 786,20</b>

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Llevando un correcto control de las actividades, identificando las oportunidades de mejora en la reducción de las horas improductivas de **10,2 a 8,8 por día**, se pudo alcanzar mejoras significativas en la eficiencia del proceso en **10,2%**, lo cual permite mejorar la perforación rotativa y reducir costos operativos.
2. Cuando se perfora en rocas de alta resistencia, es fundamental utilizar brocas con el diseño correcto y aplicar las variables operacionales necesarias para obtener un alto Rango de penetración, que como se ha demostrado, aumentó en **23,8%**.
3. Realizando pruebas con diferentes fabricantes de brocas tricónicas, teniendo diferentes calidades de materiales y diseños; se tomó en cuenta para su selección el Costo de la Broca (\$), la Vida útil obtenida (m) y el Rango de penetración (m/h); resultando una reducción del costo por metro perforado en **12,5%**.
4. Mejorando la Eficiencia del proceso (%) en un **10,2%**, el Rango de penetración (m/h) en un **23,8%** y el Costo por metro perforado de la Broca tricónica (\$/m) en un **25,6%**; se logró reducir el Costo unitario de perforación (\$/t) en **23,4%**

## RECOMENDACIONES

1. Para incrementar la eficiencia del proceso, es necesario que se realice un estudio de tiempos e identificar las actividades improductivas, iniciando con un buen reporte de perforación, con personal capacitado que reporte indicadores a tiempo real y supervisión que pueda tomar decisiones inmediatas y acciones preventivas.
2. Es necesario continuar con pruebas de barrenos de diferentes fabricantes, con el fin de que permita seleccionar el barreno más rentable. Si bien la broca tricónica es la que tiene mayor afectación en el costo de perforación, se pueden realizar pruebas con barras, *topsub*, *bitsub*, *shock absorber*, centralizadores, etc.
3. Debido a la limitación del peso sobre la broca, en libras, de la perforadora Sandvik 1190E, para ejercer un mayor *Pulldown* (Lbs/pulg<sup>2</sup>) para perforar rocas de alta y muy alta resistencia compresiva (psi) para diámetros de 12 ¼", se recomienda evaluar reducir el diámetro de perforación, mediante el análisis técnico económico de los costos unitarios de perforación y voladura. Si se desea mantener el mismo diámetro, se debe evaluar un equipo de perforación rotativa con mayor *Pulldown* que la Sandvik 1190E.
4. Investigar a detalle, factores adicionales que intervengan en el cálculo del Rango de penetración y establecer como oportunidad un nuevo modelo matemático. Algunos factores que podrían ser: Velocidad de barrido (BV), Presencia de discontinuidades en el taladro (RQD, Jn) u otros según la condición del yacimiento.
5. Analizar, evaluar y realizar un proyecto, para incluir un sistema GPS en las perforadoras Sandvik 1190E, con el fin de ubicar automáticamente la coordenada del taladro a perforar; además de un sistema, el cual el operador pueda enviar la información de actividades y datos generales de perforación a tiempo real, a una sala de control de productividad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **AGREDA Carlos**, “Curso de Perforación y Voladura, Universidad Nacional de Ingeniería”.
2. **Instituto Tecnológico Geominero de España**, “Manual de Perforación y Voladura de rocas 2da edición” (1994).
3. **Well Drilling School**, “Drilling Methods” (2008).
4. **Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile**, “Curso Explotación de Minas” (2008).
5. **ATLAS COPCO**, “Entrenamiento básico de operación de perforadoras” (2012).
6. **SANDVIK**, “Curso de barrenos de perforación rotativa” (2015).
7. **EXSA**, “Manual Práctico de Voladura, Cuarta edición”.
8. **BAUER Alan**, “Open pit drilling and blasting, JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY” (1971).
9. **AMORIN Jesús**, “Tesis Profesional: Evaluación de Brocas PDC y de diamantes en el Noroeste Peruano, FIPP-UNI” (1996).
10. **GONZALEZ Andrés**, “Tesis Profesional: Diseño del programa de brocas requerido para perforar el pozo direccional, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL DE ECUADOR” (2010).
11. **MORALES Jorge**, “Tesis Profesional: Análisis y Generación de un Modelo para una Perforación Óptima a Tiempo real, UNI – FIP” (1990).
12. **BACA Rodolfo**, “Tesis Profesional: Ciclo de Minado de los Depósitos de Fierro de Marcona, UNI – FIGMM” (1977).

13. **AGREDA Carlos**, “Tesis Profesional: La técnica de la Simulación Aplicada al Problema del Transporte de Mineral en la Mina de Marcona (Uso de computación electrónica), UNI – FIGMM” (1974).
14. **HIDALGO Julio**, “Tesis Profesional: Perforación y disparos primarios en Marcona, UNI – FIGMM” (1974).
15. **Shougang Hierro Perú**, “EIA Ampliación de Operaciones Mina y Planta de Beneficio” (2009).

# ANEXOS

# **ANEXO 01**

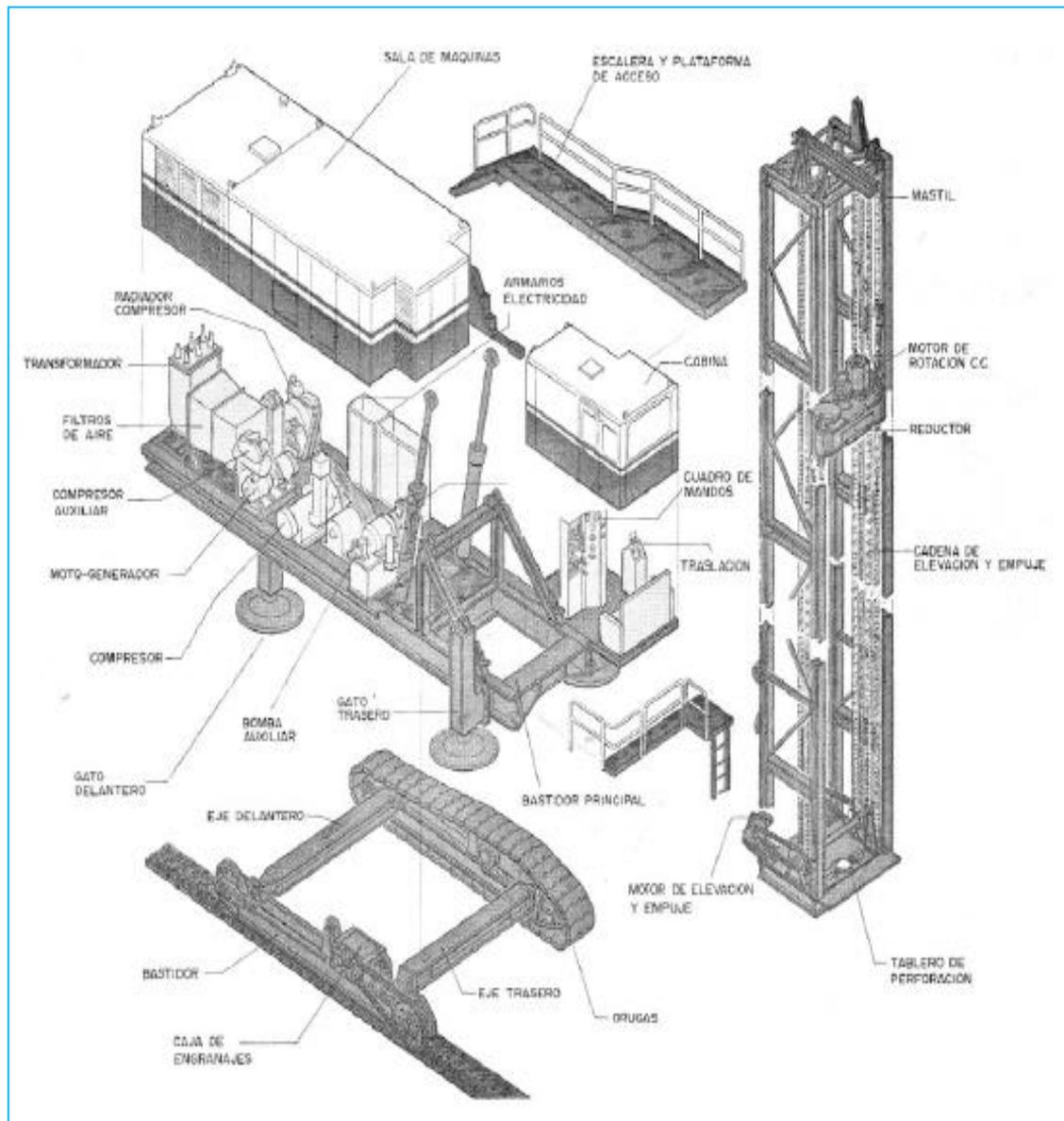
## **Matriz de Consistencia**

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES Y VARIABLES
<p><b>GENERAL:</b> ¿En qué medida el consumo excesivo de brocas tricónicas, bajos rangos de penetración y baja eficiencia del proceso, producen un aumento significativo en los costos de la perforación tricónica de rocas de alta resistencia compresiva?</p>	<p><b>GENERAL:</b> Generar la reducción del Costo Unitario de Perforación, Aumentando el Rango de penetración, la Eficiencia del proceso de perforación y la Vida útil de las Brocas tricónicas.</p>	<p><b>GENERAL:</b> Si se incrementa el Rango de penetración de una Perforadora rotativa combinando mejor sus variables operacionales, se selecciona correctamente una Broca tricónica para rocas de alta resistencia compresiva y se mejora la gestión de operaciones aumentando la Eficiencia del proceso; se logra reducir el Costo Unitario de Perforación en la mina de Marcona.</p>	<p><b>DEPENDIENTE (Y):</b> <b>Y1:</b> Costo Unitario de Perforación (\$/TM)</p>	<p><b>INDICADORES:</b> <b>1.</b> Productividad (t/h) <b>2.</b> Costo Unitario de Perforación (\$/t) <b>3.</b> Total Drilling Cost (\$/m.)</p>
<p><b>ESPECÍFICOS:</b> <b>1.</b> ¿Cómo afecta la incorrecta combinación de variables operacionales en la perforación de rocas de alta resistencia compresiva? <b>2.</b> ¿Cómo afecta en el costo de perforación, utilizar brocas tricónicas incorrectas para rocas de alta resistencia compresiva? <b>3.</b> ¿Qué ocasiona la baja eficiencia del proceso de perforación en la productividad y costos de la operación?</p>	<p><b>ESPECÍFICOS:</b> <b>1.</b> Reducir el Costo Unitario de Perforación, mediante el incremento del Rango de penetración, debido a una correcta combinación de Variables operacionales y selección de la Broca tricónica. <b>2.</b> Reducir el Costo Unitario de Perforación, mediante la reducción del Costo de la Broca tricónica, debido a la selección del recurso mediante Costo/Beneficio de la Vida útil de la broca y el Costo por tipo de fabricante. <b>3.</b> Reducir el Costo Unitario de Perforación, mediante el incremento de la Eficiencia de perforación, debido a la reducción de horas improductivas del proceso, atacando a las Actividades Contributorias y No Contributorias.</p>	<p><b>ESPECÍFICOS:</b> <b>1.</b> Si el Rango de penetración aumenta, combinando de forma correcta las variables operacionales (Pulldown, Velocidad de rotación, Velocidad de barrido); se logra reducir el Costo Unitario de Perforación en la mina de Marcona. <b>2.</b> Si se selecciona de forma correcta la Broca tricónica, por el tipo de roca de alta resistencia compresiva a perforar; se logra reducir el Costo Unitario de Perforación en la mina de Marcona. <b>3.</b> Si la Eficiencia del proceso aumenta, disminuyendo las horas improductivas con una mejor gestión de operaciones; se logra reducir el Costo Unitario de Perforación en la mina de Marcona.</p>	<p><b>INDEPENDIENTES (X):</b> <b>X1:</b> Rango de penetración (m/h) <b>X2:</b> Costo de Broca tricónica (\$/m) <b>X3:</b> Eficiencia (%)</p>	<p><b>FUNCIONES:</b> <b>1.</b> Rango de penetración (m/h) <b>2.</b> Vida útil de la broca (m) <b>3.</b> Eficiencia (%) <b>4.</b> Factor de perforabilidad (TM/m):</p>

Fuente: Elaboración propia

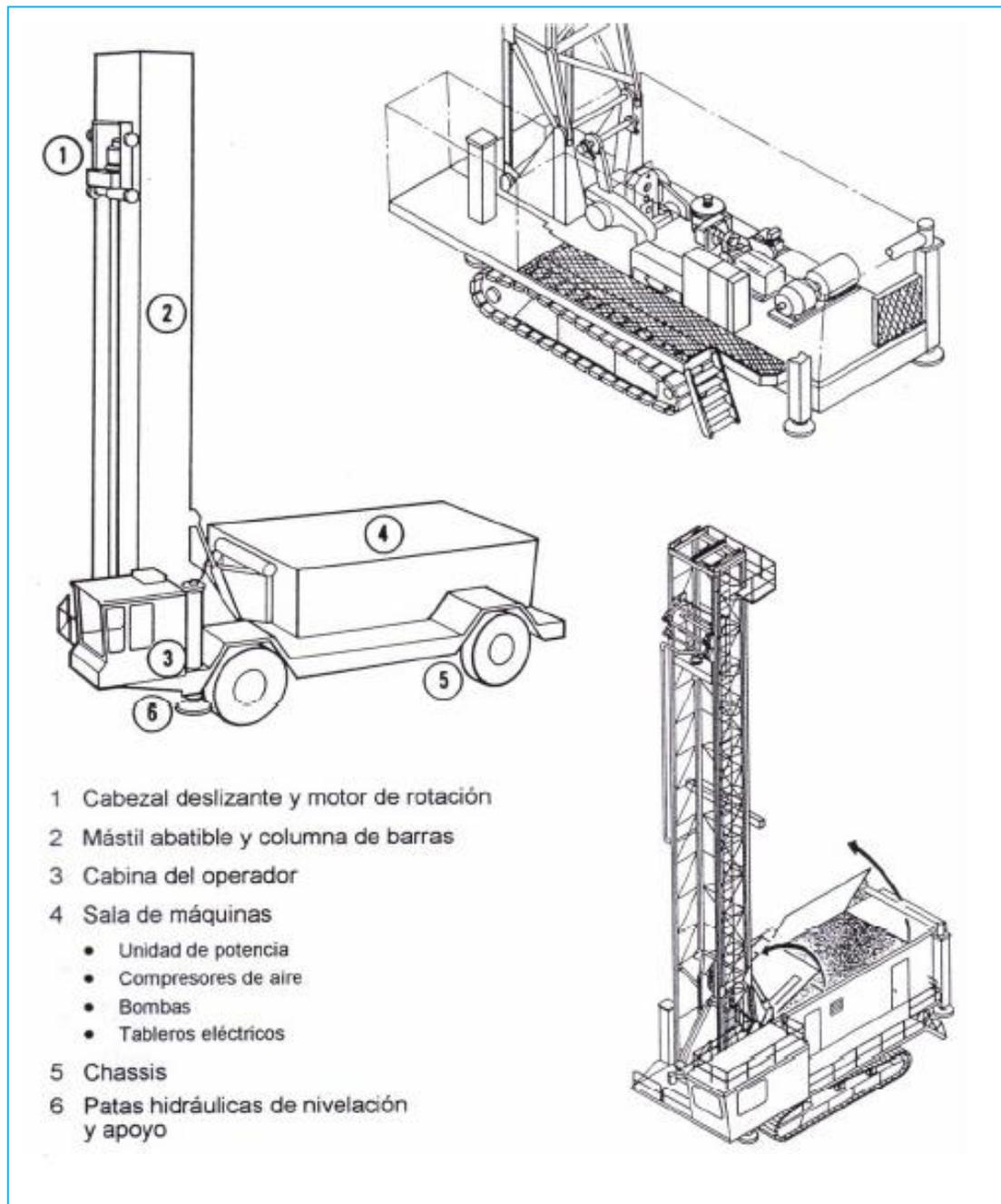
**ANEXO 02**

**Componentes Principales de una  
Perforadora Rotativa de  
Accionamiento Eléctrico**

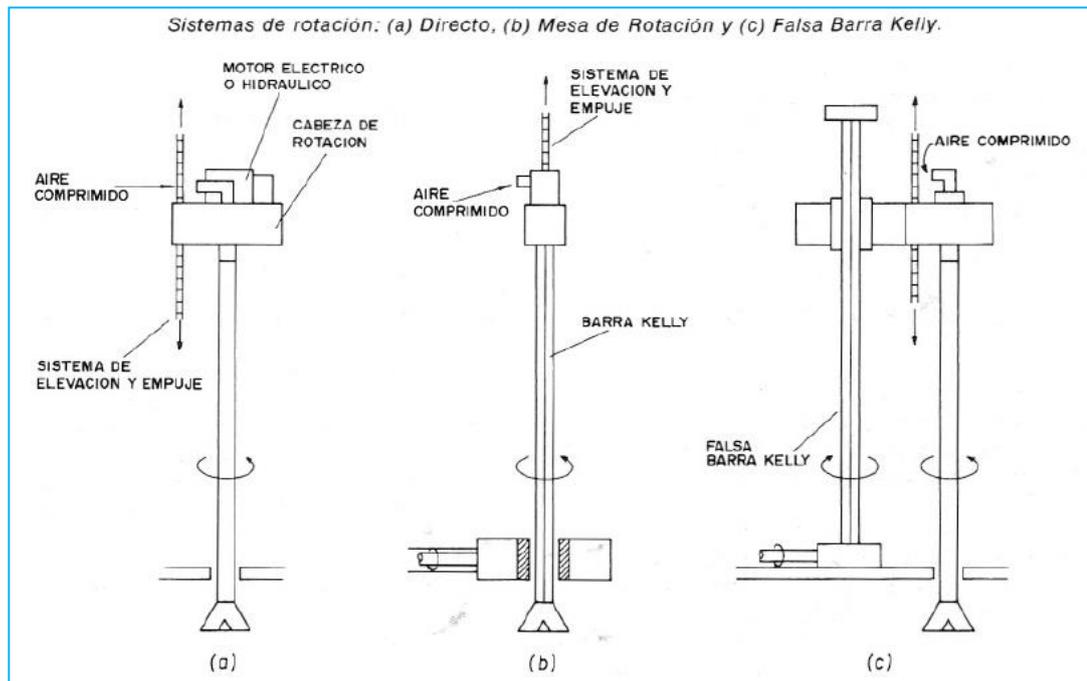


Fuente: Instituto Tecnológico Geo-minero de España.

**ANEXO 03**  
**Descripción de Componentes de**  
**una Perforadora Rotativa**

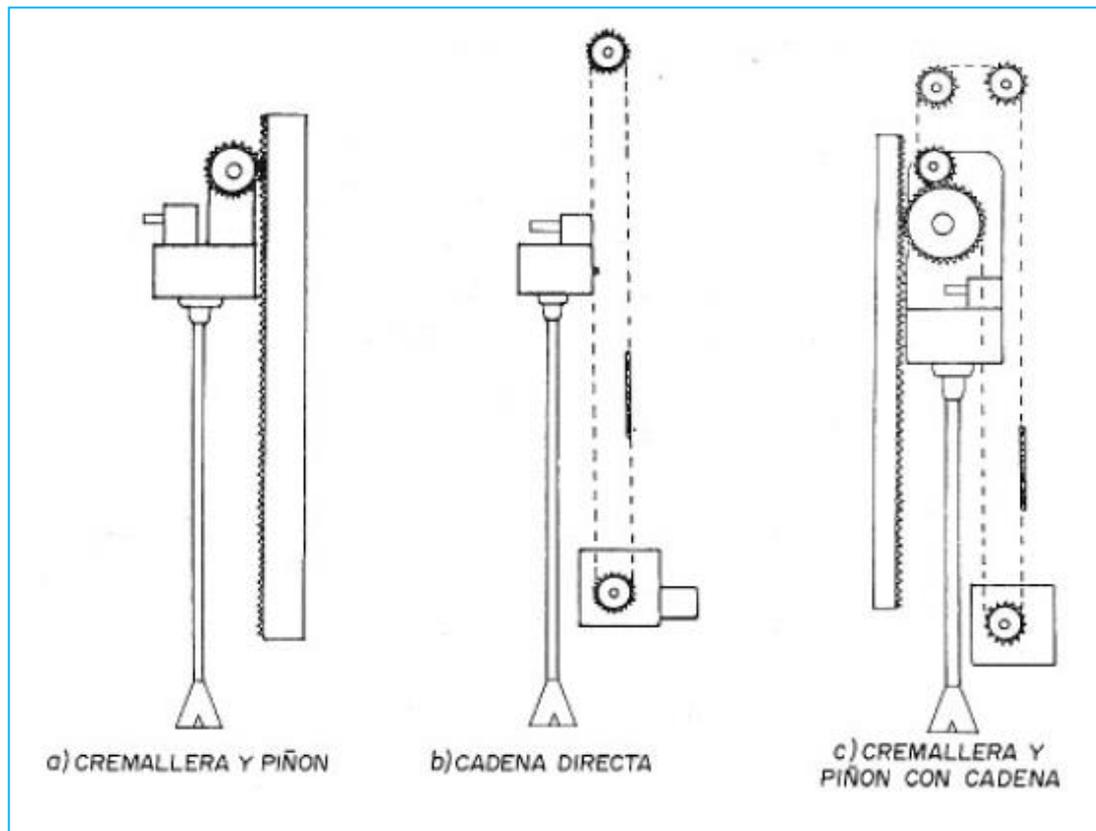


**Fuente: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas.**



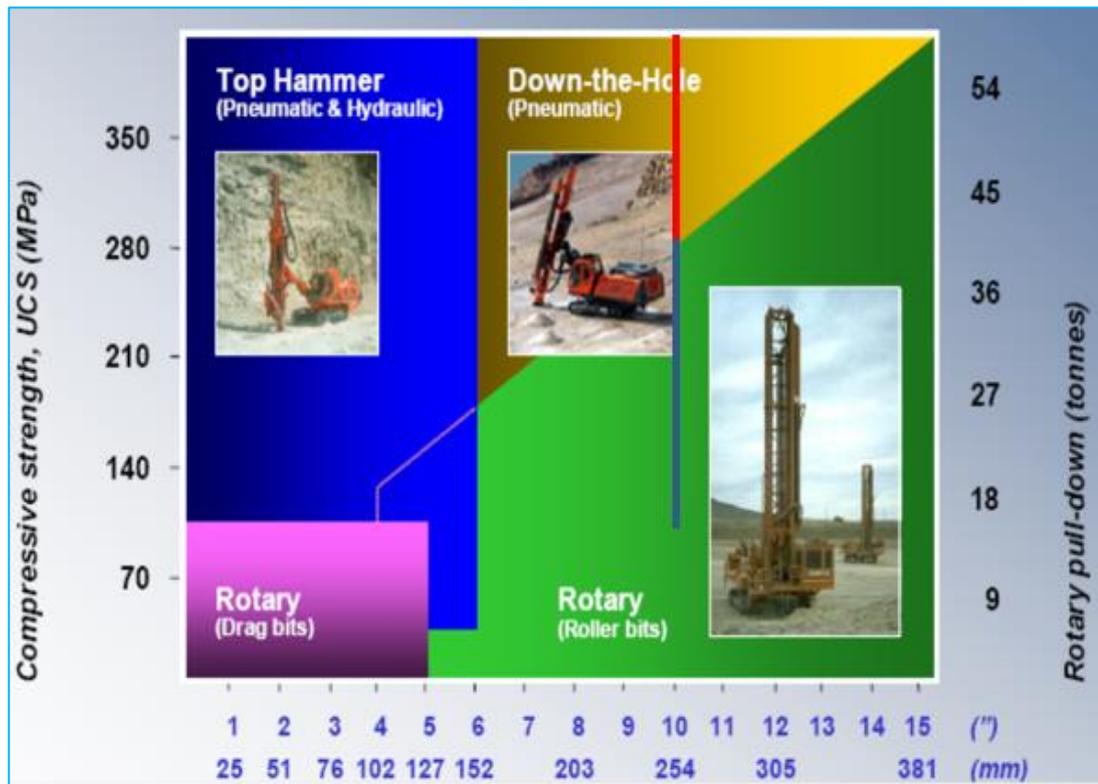
**ANEXO 04.- Sistemas de Rotación Directos e Indirectos para Perforación Rotativa.**

**Fuente: Instituto Tecnológico Geo-minero de España.**



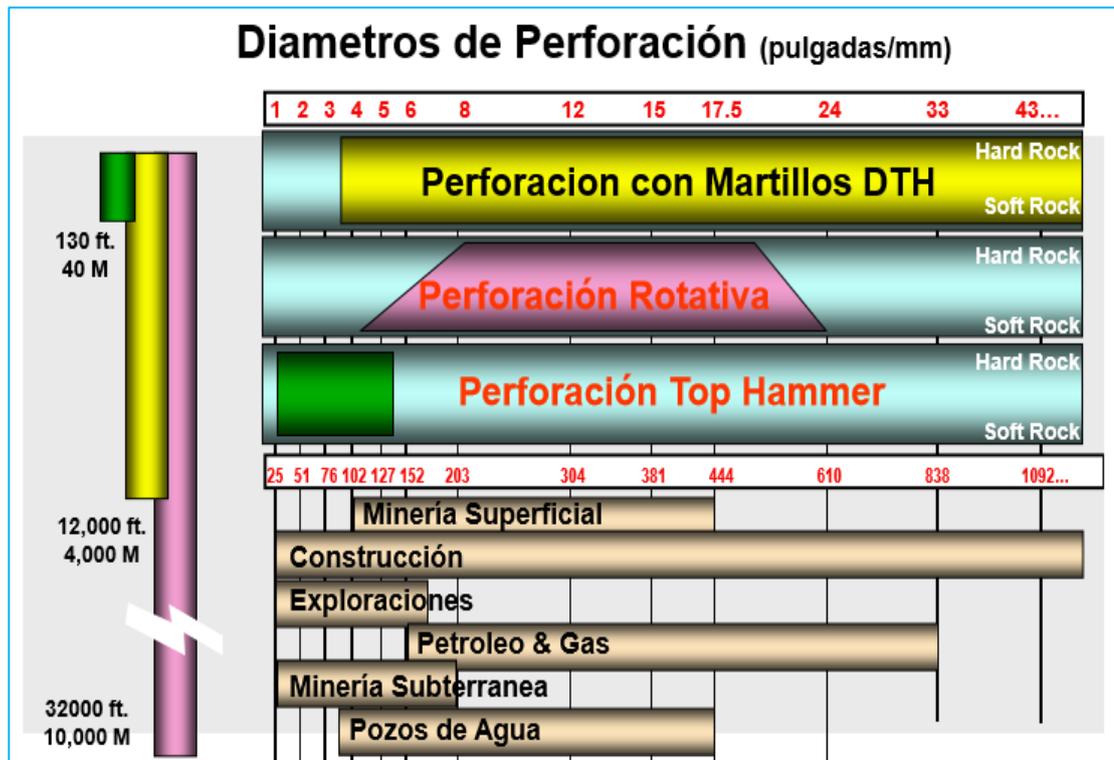
**ANEXO 05.- Mecanismos de Empuje y Elevación de Columna de Perforación.**

**Fuente: Instituto Tecnológico Geo-minero de España.**



**ANEXO 06.- Selección de Perforadoras según Tipo de Roca, Carga Aplicada y Diámetro de Perforación.**

**Fuente: SANDVIK**



**ANEXO 07.- Diámetros y Longitudes de Perforación según Tipo de Roca, Tipo de Perforación y Sector Industrial Aplicado.**

**Fuente: SANDVIK**

Engine power	783 kW 1050 hp max, 60 Hz	
Max Hole Depth	85 m	
Dimension (L-W-H)	18540 x 7360 x 27660 mm 72' Head stroke	
Dimension Mast down (L-W-H)	28450 x 3900 x 8300 mm 72' Head stroke Width, shipping	
Hole diameter	229 - 349 mm	
Operating weight (empty)	140616 kg	
Rotation power	172 kW Maximum rotary horsepower	
Rotation torque	16900	
Single pass depth	20 m	
Max air pressure	5.51 bar	
Drilling technique	Rotary	

***ANEXO 08.- Características Técnicas de Perforadoras Rotativas (PER-02, PER-03 y PER-04) Eléctricas de Marca Sandvik, Modelo 1190E.***

***Fuente: SANDVIK***

**ANEXO 09**  
**Resultado de Prueba con Brocas**  
**Tricónicas**

**ANEXO 09A.- Fabricante PDB 722**

Nº	PERFORADORA	MARCA	DIAMETRO	MODELO	METROS EFECTIVOS PERFORADOS	PO	OX	DESM	TDC (US\$/m)	PR (m/HN)
1	PER 02	PDB	12 ¼	722	1019,0	75%	12%	13%	12,76	24,83
2	PER 02	PDB	12 ¼	722	1469,6	22%	5%	73%	11,26	25,72
3	PER 02	PDB	12 ¼	722	1037,8	62%	3%	35%	15,13	19,47
4	PER 03	PDB	12 ¼	722	1178,0	65%	0%	35%	12,72	23,55
5	PER 03	PDB	12 ¼	722	2491,8	39%	0%	61%	9,62	27,38
6	PER 04	PDB	12 ¼	722	1646,2	61%	3%	36%	11,46	24,30
7	PER 04	PDB	12 ¼	722	571,7	100%	0%	0%	16,61	22,82
8	PER 04	PDB	12 ¼	722	1188,0	78%	0%	22%	11,94	25,60
9	PER 02	PDB	12 ¼	722	1772,3	31%	26%	43%	11,47	23,84

**Fuente: P&V, COSAPI MINERÍA.**

**ANEXO 09B.- Fabricante SHAREATE 742**

Nº	PERFORADORA	MARCA	DIAMETRO	MODELO	METROS EFECTIVOS PERFORADOS	PO	OX	DESM	TDC (US\$/m)	PR (m/HN)
1	PER 02	SHAREATE	12 1/4	742	1917,9	73%	0%	27%	14,65	17,15
2	PER 02	SHAREATE	12 1/4	742	1600,3	98%	0%	2%	15,11	17,03
3	PER 02	SHAREATE	12 1/4	742	2159,4	27%	30%	43%	10,39	25,08
4	PER 02	SHAREATE	12 1/4	742	2982,6	40%	2%	58%	10,47	23,64
5	PER 04	SHAREATE	12 1/4	742	1578,0	77%	0%	23%	12,62	21,16
6	PER 04	SHAREATE	12 1/4	742	2728,6	27%	10%	63%	9,39	27,11
7	PER 04	SHAREATE	12 1/4	742	1059,8	97%	0%	3%	12,01	25,33

**Fuente: P&V, COSAPI MINERÍA.**

**ANEXO 09C.- Fabricante MAMMOTH 742**

Nº	PERFORADORA	MARCA	DIAMETRO	MODELO	METROS EFECTIVOS PERFORADOS	PO	OX	DESM	TDC (US\$/m)	PR (m/HN)
1	PER 03	MAMMOTH	12 1/4	742	1886,5	41%	5%	54%	12,01	21,61
2	PER 04	MAMMOTH	12 1/4	742	1935,1	34%	0%	66%	10,17	26,26
3	PER 04	MAMMOTH	12 1/4	742	2522,6	99%	0%	1%	8,30	31,77
4	PER 04	MAMMOTH	12 1/4	742	1647,7	21%	0%	79%	8,53	34,26

**Fuente: P&V, COSAPI MINERÍA.**

**ANEXO 09D.- Fabricante WLS 742**

Nº	PERFORADORA	MARCA	DIAMETRO	MODELO	METROS EFECTIVOS PERFORADOS	PO	OX	DESM	TDC (US\$/m)	PR (m/HN)
1	PER 02	WLS	12 1/4	742	1327,6	90%	0%	10%	15,11	18,47
2	PER 02	WLS	12 1/4	742	929,4	72%	0%	28%	4,62	15,74
3	PER 02	WLS	12 1/4	742	1964,7	36%	0%	64%	14,22	18,23

**Fuente: P&V, COSAPI MINERÍA.**

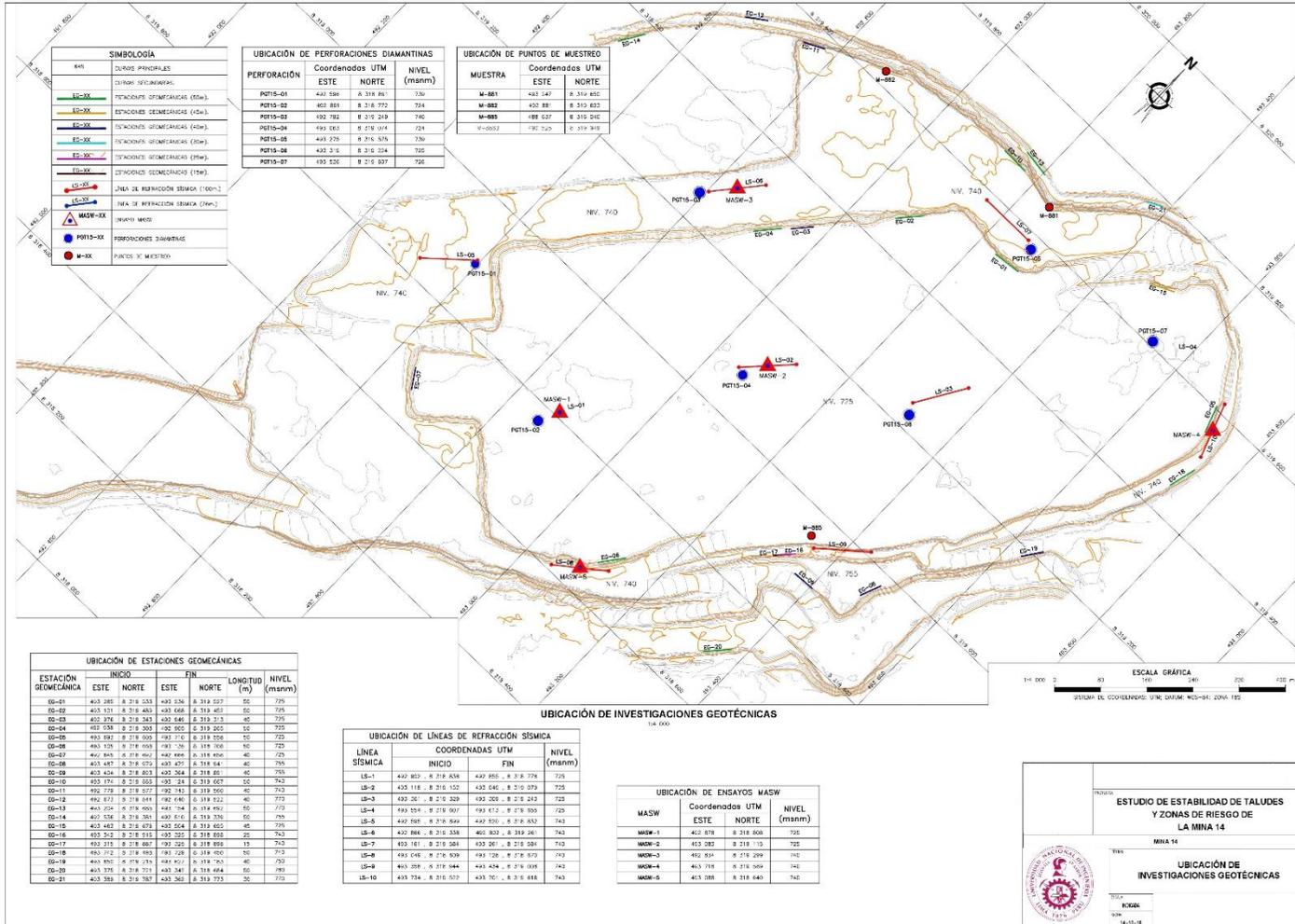
**ANEXO 10**

**Plano de Ubicación de Sondajes**

**Diamantinos y Muestreos**

**Geotécnicos de Taludes**

**en Mina 14**



Fuente: Planeamiento, COSAPI MINERÍA