

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN Y EL COSTO
TOTAL DE PERFORACIÓN MEDIANTE UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO
EN LA UNIDAD MINERA TOQUEPALA – TACNA, 2024**

TESIS

Presentada por:

Bach. Everth Giovanni Armando Yufra Flores

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN Y EL
COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN MEDIANTE UN ANÁLISIS
ESTADÍSTICO EN LA UNIDAD MINERA TOQUEPALA –
TACNA, 2024

Tesis sustentada y aprobada el 17 de diciembre de 2025; estando el jurado calificador
integrado por:

PRESIDENTE



Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

1er. MIEMBRO



Dr. Carlos Huisa Ccori

2do. MIEMBRO



Dr. Pedro Arias Cubillas

ASESOR



Dr. Pedro Arias Cubillas

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Pedros Arias Cubillas, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 9711-2025-FAIN/UNJBG de la tesis titulada:

“RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN Y EL COSTO TOTAL DE PERFORACIÓN MEDIANTE UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN LA UNIDAD MINERA TOQUEPALA – TACNA, 2024”.

Presentado por el Bachiller Everth Giovanni Armando Yufra Flores, para optar por el Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual **TURNITIN** cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es **11%**. Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención del título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos, DNI




Dr. Pedro Arias Cubillas
04628474



FIRMA TESISTA

Nombres y apellidos, DNI



Bach. Everth Giovanni Armando
Yufra Flores
DNI 70661265



DEDICATORIA

A mi familia y a mi mujer por darme
fortaleza y aliento para culminar mi
tesis.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema a investigar	3
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Formulación del problema	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problemas específicos	4
1.4. Objetivos de la investigación	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Justificación e importancia de la investigación	5

1.6.	Limitaciones.....	6
1.7.	Viabilidad del estudio	7
1.8.	Formulación de hipótesis	7
1.8.1.	Hipótesis general.....	7
1.8.2.	Hipótesis específicas.....	7
1.9.	Variables.....	8
1.10.	Operacionalización de variables	8
1.10.1.	Definición conceptual	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación.....	11
2.1.1.	Antecedentes internacionales.....	11
2.1.2.	Antecedentes nacionales	12
2.2.	Bases teóricas.....	14
2.2.1.	Perforación rotativa con triconos	14
2.2.2.	Columna o sarta de perforación	25
2.2.3.	Velocidad de penetración	37
2.2.4.	Costo total de perforación (TDC)	38
2.2.5.	Parámetros de perforación	39
2.2.6.	Propiedades físicas de las rocas	42

2.3.	Definiciones conceptuales	44
2.4.	Generalidades de la mina superficial del Estudio	46
2.4.1.	Ubicación y acceso	47
2.4.2.	Ubicación política	47
2.4.3.	Ubicación geográfica	47
2.4.4.	Geología local y regional	48
2.4.5.	Geología.....	50
2.4.6.	Litología de los depósitos	51
2.4.7.	Mineralogía	54
2.4.8.	Mineralogía de los depósitos	54
2.4.9.	Estructuras	56
2.4.10.	Alteración.....	57
2.4.11.	Características geológicas del tajo	59

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1.	Tipo y nivel de investigación	61
3.2.	Diseño de la investigación	62
3.3.	Población y muestra.....	63
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	64
3.5.	Técnicas para el procesamiento y análisis de datos	64

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1.	Descripción de las pruebas experimentales	67
4.1.1.	Selección de datos.....	68
4.1.2.	Prueba de normalidad o simetría	76
4.1.3.	Análisis de correlación.....	80
4.2.	Presentación y análisis de los resultados	82
4.3.	Contrastación de hipótesis	84

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1.	Aplicación de la tecnología encontrada	98
5.2.	Contraste con trabajos de investigación similares	99
CONCLUSIONES		100
RECOMENDACIONES.....		102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
ANEXOS		106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables de estudio	8
Tabla 2: Flota de perforadoras primarias	26
Tabla 3: Características de los adaptadores superiores de la mina superficial	31
Tabla 4: Características de los barrenos de la mina superficial	33
Tabla 5: Características de los guidores de la mina superficial	35
Tabla 6: Características de los reamers de la mina superficial	36
Tabla 7: Características de las brocas de la mina superficial.....	37
Tabla 8: Detalle de costo horario máquina de Diciembre - 2024	39
Tabla 9: Fuerza de empuje límite según el diámetro de la broca.....	40
Tabla 10: Velocidad de rotación recomendada según el tipo de roca	41
Tabla 11: Velocidades de evacuación de detritus	42
Tabla 12: Cálculo de tamaño de muestra significativa	63
Tabla 13: Muestras usadas para las pruebas estadísticas	68
Tabla 14: Muestras usadas para las pruebas estadísticas	78

Tabla 15: Resultados de la correlación entre la VP y el TDC.....	81
Tabla 16: Resultados del análisis estadístico para la prueba de hipótesis.....	84
Tabla 17: Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno duro	86
Tabla 18: Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno medio.....	87
Tabla 19: Resultados generales para las pruebas de pulldown en terreno duro.....	89
Tabla 20: Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno medio.....	91
Tabla 21: Costos de perforación del mes de marzo para terreno duro.....	94
Tabla 22: Costos de perforación del mes de marzo para terreno medio	96
Tabla 23: Resultados homólogos de autores	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principales componentes de una perforadora rotativa de acción eléctrica	15
Figura 2: Diseño del tren de orugas.....	17
Figura 3: Esquema de acción de una perforadora diésel con un motor único.....	19
Figura 4: Sistemas de Rotación: Directo (a), Mesa de Rotación (b) y Falsa Barra Kelly (c).....	20
Figura 5: Sistemas de elevación y empuje	21
Figura 6: Sistemas de empuje por Cilindro Hidráulico	22
Figura 7: Cambiador de barras tipo revólver o carrusel	24
Figura 8: Columna.de.perforación.de las perforadoras rotativas de la mina.....	27
Figura 9: Amortiguador modelo KING COBRA	29
Figura 10: Parámetros de perforación según el tipo de terreno.....	38
Figura 11: Imagen satelital de la mina superficial.....	46
Figura 12: Ubicación de la mina superficial.....	48
Figura 13: Geología de la región de Tacna.....	49

Figura 14: Geología de la mina superficial	51
Figura 15: Mineralización en la mina superficial.....	56
Figura 16: El stockwork	57
Figura 17: La diorita.....	58
Figura 18: La pirita.....	59
Figura 19: Diseño por fases de la mina superficial	60
Figura 20: Gráfico de normalidad de la variable velocidad de penetración.....	79
Figura 21: Gráfico de normalidad de la variable costo total de perforación	79
Figura 22: Gráfico de dispersión entre la VP y el TDC.....	83
Figura 23: Escala de magnitud de correlación en base al coeficiente de Spearman o Pearson.....	84
Figura 24: RPM óptimo en terreno duro	86
Figura 25: RPM óptimo en terreno medio.....	88
Figura 26: Pulldown óptimo en terreno duro	90
Figura 27: Pulldown óptimo en terreno medio.....	92

Figura 28: Avance de la broca vs Velocidad de Penetración en terreno duro.....	93
Figura 29: Resultados con parámetros de perforación antiguos y nuevos	94
Figura 30: Avance de la broca vs Velocidad de Penetración en terreno medio	96
Figura 31: Resultados con parámetros de perforación antiguos y nuevos	97

RESUMEN

Este estudio propuso como objetivo general “Determinar la relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024”.

La investigación se enmarca dentro del tipo no experimental y corresponde a un nivel correlacional. Asimismo, la población de estudio estuvo conformada por las brocas tricónicas descartadas durante el año 2024, considerando como muestra cada una de ellas. Las técnicas e instrumentos empleados incluyeron la recopilación de datos, el análisis documental y el procesamiento estadístico mediante el software SPSS.

Luego de definir la muestra representativa se realizó el análisis estadístico con los valores de la velocidad de penetración y el costo total de perforación (TDC), donde se pudo obtener que, con un nivel de confianza del 95% se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.7, es decir, hay una relación inversa de magnitud alta entre ambas variables.

Luego, se realizaron pruebas de campo para hallar los parámetros óptimos de pulldown y rpm para la dacita porfirítica en fase 5 y la diorita en fase 6. Se concluye que el uso de los nuevos parámetros de perforación supone un ahorro del 30% para los tipos de terreno analizados.

Palabras clave: Brocas tricónicas, velocidad de penetración, costo total de perforación.

ABSTRACT

This study aimed to determine the relationship between penetration rate and total drilling cost of tricone bits at the Toquepala Mining Unit in Tacna, Peru, in 2024.

The research was non-experimental and correlational in nature. The study population consisted of tricone bits discarded during 2024, with each bit considered as a sample. The techniques and instruments employed included data collection, document analysis, and statistical processing using SPSS software.

After defining the representative sample, statistical analysis was performed on the penetration rate and total drilling cost (TDC) values. With a 95% confidence level, a correlation coefficient of -0.7 was obtained, indicating a strong inverse relationship between the two variables.

Field tests were then conducted to determine the optimal pulldown and RPM parameters for porphyritic dacite in phase 5 and diorite in phase 6. It was concluded that using the new drilling parameters resulted in a 30% cost savings for the analyzed soil types.

Keywords: Tricone bits, penetration rate, total drilling cost.

INTRODUCCIÓN

La perforación constituye una de las etapas más críticas y costosas dentro de las operaciones mineras, siendo el Costo Total de Perforación (TDC) un factor determinante en la eficiencia y rentabilidad de los proyectos. La adecuada gestión de este indicador permite optimizar los recursos, reducir gastos innecesarios y garantizar un avance sostenido en la explotación del yacimiento. En este sentido, la búsqueda de estrategias que contribuyan a minimizar el TDC se convierte en un objetivo esencial para las empresas mineras.

La reducción del TDC no solo implica un ahorro económico directo, sino también un impacto positivo en la productividad y la competitividad de la unidad minera. Lograr menores costos a través de un mejor aprovechamiento de los parámetros de perforación y la selección adecuada de herramientas de corte representa una ventaja estratégica en un sector altamente demandante. Así, comprender los factores que influyen en el TDC resulta fundamental para mejorar los procesos de perforación y fortalecer la sostenibilidad de las operaciones mineras.

El estudio fue desarrollado con la siguiente estructura:

En el Capítulo I, se muestran la problemática del problema a investigar, el planteamiento del problema, la justificación, objetivos, hipótesis y características de las variables.

En el Capítulo II, se desarrollan los antecedentes del problema a investigar, el marco teórico y las bases teóricas.

En el Capítulo III, se desarrollan la metodología empleada para desarrollar el presente estudio, el tipo y diseño de la investigación, la población y muestra, los métodos empleados para la recolección de datos y el tratamiento estadístico.

En el Capítulo IV, se presentan los resultados y se realiza el análisis de los mismos.

En el Capítulo V, se realiza la discusión de los resultados, comparando lo obtenido con los resultados de estudios similares.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendación, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema a investigar

La perforación es la primera operación del ciclo de minado que se realiza en la explotación de yacimientos mineros, donde el objetivo es realizar taladros dentro del macizo rocoso, para posteriormente ser cargados de explosivos y sus accesorios para fragmentar el macizo rocoso.

El último estudio de velocidad de penetración y costo total de perforación se realizó en el año 2022, en el cual se evaluaba la reducción del costo total de perforación de las brocas tricónicas de 12 1/4 pulgadas en fase 4 y fase 5.

Actualmente, se vienen usando brocas tricónicas de 11 y 12 ¼, donde las primeras son usadas principalmente en zonas mineralizadas y las segundas son usadas en zonas de desmonte o leach según sea la necesidad operativa.

1.2. Descripción del problema

El rendimiento de las brocas de las brocas tricónicas en la unidad minera es una problemática constante, lo que se busca es obtener el mayor rendimiento posible con el menor costo total de perforación por metro posible. Se conoce empíricamente la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas,

sin embargo, no se ha demostrado estadísticamente el tipo y grado de relación que hay entre ambas variables.

Conociendo la naturaleza estadística de la relación que exista entre ambas variables, se puede tener mayor información para adoptar un mejor enfoque respecto a la preocupación latente que supone reducir los costos operativos del proceso de perforación.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala - Tacna, en 2024?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cuáles son los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación de la broca tricónica?

¿Cuáles son los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno?

¿Qué impacto tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Determinar la relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.

1.4.2. Objetivos específicos

Definir los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación.

Identificar los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno.

Identificar el impacto que tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

El presente estudio se planteó como respuesta a la necesidad de analizar la forma de aumentar el rendimiento de las brocas tricónicas con el menor costo total de perforación por metro posible.

Con la finalidad de analizar la forma de mejorar el performance de las brocas tricónicas, se recopiló el consumo total de brocas del año 2024, para poder establecer una relación entre ambas variables de estudio y definir los factores que deben ser tenidos en cuenta para mejorar el rendimiento de las brocas tricónicas.

Conociendo la relación entre las dos variables de estudio, podremos obtener algunas alternativas para mejorar el proceso de perforación primaria, aumentando significativamente el rendimiento en metros de nuestras brocas haciendo uso de correctos parámetros de perforación y de esta forma mejorando las prácticas operacionales de los perforistas.

1.6. Limitaciones

Ubicación geográfica

La ubicación del área de estudio es una unidad minera alejada de la ciudad de Tacna, lo que significó demoras en el avance y revisión del presente trabajo de investigación.

Acceso a los datos

La recolección de los datos usados en el presente estudio se vio afectada por la confidencialidad de la información de la Unidad Minera Toquepala. Realizando las coordinaciones respectivas se pudo obtener los datos necesarios para el tratamiento estadístico del presente trabajo.

Cantidad de datos recopilados

Se tuvo que esperar un tiempo razonable para poder obtener una cantidad de datos representativos para poder realizar el análisis estadístico respectivo.

1.7. Viabilidad del estudio

El presente estudio es viable debido a que se tuvo acceso a los reportes de consumos mensuales de brocas tricónicas, lo que va a permitirnos realizar el tratamiento y análisis estadístico de correlación respectivo para poder contrastar las hipótesis que fueron planteadas en el estudio. La disponibilidad de tiempo y de recursos económicos necesarios son otros de los factores claves que apoyan la viabilidad del trabajo que se realizó.

1.8. Formulación de hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.

1.8.2. Hipótesis específicas

Existen factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación

Existen parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno.

Determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación generará un impacto económico positivo en la empresa.

1.9. Variables

Tabla 1

VARIABLES DE ESTUDIO

VARIABLE 1	Velocidad de penetración
VARIABLE 2	Costo total de perforación

Fuente: Elaboración propia

1.10. Operacionalización de variables

1.10.1. Definición conceptual

Variable 1: Velocidad de penetración

Alaya (2018), la define como un término usado para determinar el rendimiento de las perforadoras y se mide mediante los metros perforados durante un tiempo determinado, es decir metros por horas o metros por minutos. El que determina las velocidades máximas de perforación es la broca o tricono que estemos usando, esta es nuestra limitante es por eso que debemos escoger adecuadamente la broca para el tipo de terreno en el vamos a trabajar.

Indicadores:

- Distancia total recorrida (m)
- Tiempo total de uso de la broca (hr)

Variable 2: Costo total de perforación

Castro (2019), lo define como el mejor medio de determinar cuál es la broca ideal a utilizar es hacer una evaluación de los aspectos económicos. El costo total de perforación (TDC) es el costo parcial de perforación (PDC) incluyendo la productividad en la ecuación. El TDC incluye el costo de la broca, el rendimiento por hora del equipo de perforación, pies o metros por hora y distancia perforada. El costo parcial de perforación (PDC) es el precio al que se adquirió la broca dividido entre la distancia que perfora.

Indicadores:

- Costo unitario de la broca (\$)
- Distancia total recorrida (m)
- Costo horario máquina (\$/hr)
- Velocidad de penetración (m/hr)

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$TDC = \frac{\text{Costo de la broca (\$)}}{\text{Total de metros perforados}} + \frac{\text{Costo horario del equipo } \left(\frac{\$}{m}\right)}{\text{Velocidad de penetración } \left(\frac{m}{h}\right)}$$

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala - Tacna, en 2024?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS: ¿Cuáles son los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación de la broca tricónica? ¿Cuáles son los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno? ¿Qué impacto tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL: Determinar la relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS: Definir los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación. Identificar los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno. Identificar el impacto que tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL: Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS: Existen factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación Existen parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno. Determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación generará un impacto económico positivo en la empresa.</p>	<p>VARIABLE 1 Velocidad de penetración Indicadores: Distancia total recorrida (m) Tiempo total de uso (hr)</p> <p>VARIABLE 2 Costo total de perforación Indicadores: Costo unitario de la broca (\$) Distancia total recorrida (m) Costo horario máquina (\$/hr) Velocidad de penetración (m/hr)</p>
MÉTODO Y DISEÑO	POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	
<p>TIPO Básica</p> <p>NIVEL Correlacional</p> <p>DISEÑO No experimental</p>	<p>POBLACIÓN Brocas tricónicas descartadas en la mina superficial del sur del Perú en el año 2024.</p> <p>MUESTRA Cada una de las brocas tricónicas descartadas</p>	<p>TÉCNICAS Recopilación de datos Análisis Documental</p> <p>INSTRUMENTOS Reportes de brocas consumidas obtenidos del sistema dispatch Software estadístico SPSS</p>	

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Polanco (2016), en su estudio “Mejoras de la gestión de perforación mina Chuquicamata” tuvo como objetivo mejorar la gestión del proceso de perforación, para lo cual recopila datos históricos de los equipos de perforación y de sus indicadores para elaborar bases de datos e identificar oportunidades de mejora aplicando diferentes herramientas de gestión. Concluye que se deben identificar las demoras no programadas, lo cual se reflejará en mayores horas efectivas de trabajo, cumplimiento de metros perforados y aumento del rendimiento de los equipos.

Oña y Jimenez (2015), en su tesis “Estudio de la correlación entre la velocidad de penetración efectiva y las variables relacionadas en la perforación de pozos perforados en el Campo Auca” tuvieron como objetivo generar un modelo matemático entre las variables de perforación en los diámetros que se usan para la perforación y la tasa de perforación efectiva de los pozos, para lo cual recopilaban los datos y parámetros de los reportes finales de perforación. Concluyen que luego de aplicar una correlación lineal se establece una relación muy baja entre las variables de estudio.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Marroquín (2022), en su estudio “Reducción del costo total de perforación incrementando la velocidad de penetración en el Asentamiento Minero de Toquepala – Tacna” tuvo como objetivo reducir los costos totales de perforación mediante el incremento de la velocidad de penetración, para lo cual realizó como prueba un aumento de parámetros en las perforadoras de fase 4 y 5 para posteriormente procesar estadísticamente y analizar los datos obtenidos. Concluye que existe una reducción de los costos totales de perforación en los distintos tipos de terreno analizados y que hay otros factores que también afectan a las variables de estudio como son la presión de aire y las correctas prácticas operativas de los perforistas.

Chambe (2024), en su tesis “Optimización del performance de brocas tricónicas por medio de un análisis comparativo de brocas Terelion vs Cenerg en la Unidad Minera Toquepala” tuvo como finalidad identificar la broca con mejor rendimiento en 11 y 12^{1/4} pulgadas para poder reducir el costo total de perforación por medio de una correcta selección de triconos, para lo cual uso los reportes de brocas descartadas y por medio de un análisis estadístico logró identificar la broca con mejor performance por diámetro. Concluye que realizando el estudio comparativo se ha reducido el TDC (costo total de perforación).

Montoya (2019), en su estudio “Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Southern Peru Cooper Corporation 2018” tuvo como finalidad analizar las brocas tricónicas para reducir el costo total de perforación, para lo cual usó datos obtenidos en

pruebas en campo y reportes de brocas descartadas concluye que se redujo el costo total de perforación y se optimizaron los tiempos de perforación, además se seleccionó la mejor marca de tricono por cada diámetro.

Alaya (2018), en su tesis “Influencia de la velocidad de penetración en el proceso de perforación primaria en Minera Yanacocha, Cajamarca, 2018” tuvo como objetivo determinar de qué manera influye la velocidad de penetración en el proceso de perforación, para el presente trabajó se usaron fichas de recolección de datos para poder tener un registro de los parámetros y aspectos de interés de las perforadoras. Concluye que logrando incrementar la velocidad de penetración se puede reducir el costo total de perforación, en lo influyen los parámetros de perforación, estado del equipo y buen entrenamiento de los operadores.

Castro (2019), en su estudio “Aplicación de la Fórmula de R. Praillet para evaluar la velocidad de penetración y su impacto en la perforación primaria en una mina a tajo abierto de Ica – Perú 2018” tuvo como finalidad analizar la velocidad de penetración del proceso de perforación primaria usando la fórmula de estimación de R. Praillet, para lo cual recopiló datos y parámetros de taladros perforados para poder aplicar la fórmula de estimación, también realizó un cálculo de TDC y análisis de parámetros de perforación con herramientas estadísticas. Concluye que usando la fórmula de estimación de Praillet se logra un aumento de la velocidad de penetración en la perforación primaria de la mina.

2.2. Bases teóricas

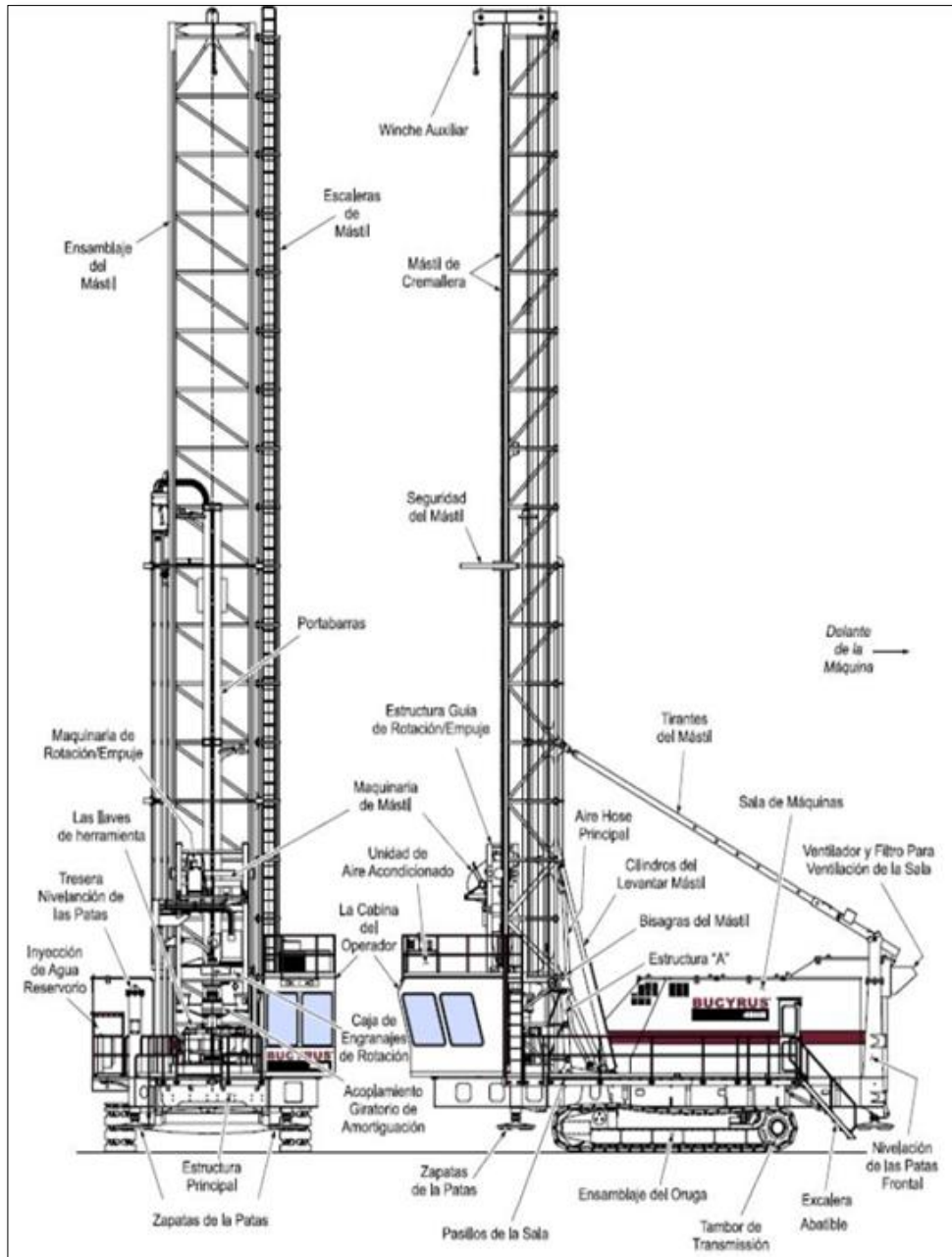
2.2.1. Perforación rotativa con triconos

López (2003), señala que hasta 1949, la mayor parte de los barrenos para voladura eran realizados mediante perforadoras a rotopercusión y sólo en el caso de rocas muy blandas era aplicable la perforación a rotación mediante brocas de corte o trépanos. La apertura en Estados Unidos de grandes explotaciones de carbón a cielo abierto, con espesores de recubrimiento que alcanzaban hasta 40 m, y la aparición en el mercado de un explosivo a granel barato y de gran eficiencia energética como el ANFO, fueron acontecimientos que impulsaron a los fabricantes de perforadoras a diseñar equipos de gran capacidad, capaces de alcanzar elevadas velocidades de penetración.

La perforación rotativa con triconos es la más aplicada, los perforados son capaces de ejercer empujes muy elevados sobre la broca. Estos equipos están compuestos básicamente por una fuente de energía, un conjunto de aceros o sarta de perforación, los cuales transmiten el peso, rotación y aire de barrido a una broca con dientes de acero o insertos de carburo de tungsteno que actúa sobre la roca.

Figura 1

Principales componentes de una perforadora rotativa de acción eléctrica



Fuente: Perforación rotativa con triconos (Ortiz, 2003)

a) Montaje y Sistema de Propulsión

Para las perforadoras rotativas existen dos sistemas de montaje: sobre neumáticos o sobre orugas. La elección del montaje depende de las condiciones del terreno y el grado de movilidad que requerimos. Si nuestro terreno tiene fuertes desniveles y pendientes, el montaje más adecuado sería sobre orugas, ya que nos va a proporcionar mayor estabilidad, capacidad de maniobra y flotabilidad.

López (2003) indica que un eje rígido situado en la parte trasera de la máquina y un eje pivotante permite al equipo oscilar y mantener las orugas en contacto con el terreno constantemente.

La mayoría de las grandes perforadoras son construidas sobre orugas planas, debido a que esto les da la capacidad de aumentar la capacidad de carga que pueden soportar y transmiten una menor cantidad de presión al suelo cuando se desplazan sobre él.

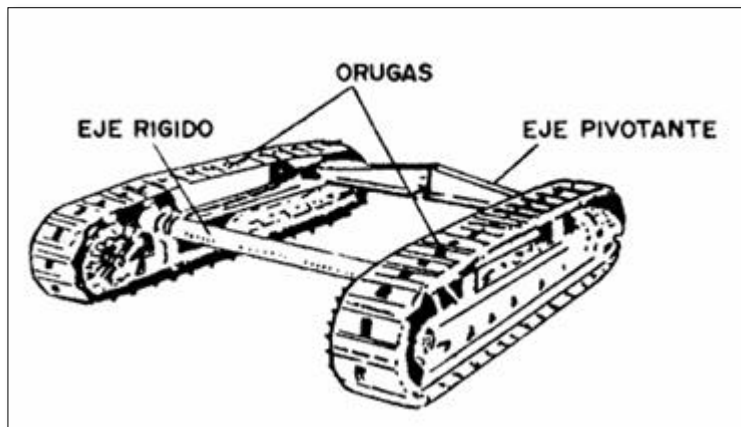
El principal problema de usar un montaje sobre orugas es que la perforadora tiene una muy baja velocidad de traslación, la cual es de 2 a 3 km/h, por lo que, si necesitamos que nuestro equipo perfora en distintos bancos alejados entre sí, lo más recomendable es seleccionar una perforadora montada sobre camión, cuya velocidad promedio es diez veces mayor que sobre orugas. Sin embargo, este no es el caso de la mina superficial del presente estudio, ya que no se desplazan mucho debido a que perforan una gran cantidad de taladros en el mismo banco.

Las máquinas más ligeras están montadas sobre camión, las cuales tienen un chasis de 2 a 3 ejes y sólo las máquinas más grandes con más de 60000 libras de empuje

tienen un chasis de 4 ejes. Durante el proceso de perforación, estos equipos se apoyan sobre 3 o 4 gatas hidráulicas que soportan su propio peso y a la vez sirven para nivelar la máquina en el terreno que se encuentren.

Figura 2

Diseño del tren de orugas



Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

b) Fuentes de energía

Las principales fuentes de energía para perforadoras rotativas son: motor eléctrico o diésel. En perforadoras que tienen un diámetro de perforación encima de 9” (230 mm) se emplea siempre energía eléctrica a tensión media, la cual es alimentada por una corriente alterna usando cables de cuatro conductores con un recubrimiento de goma. Las perforadoras pequeñas y medianas montadas sobre neumáticos pueden tener uno o dos motores diésel.

Los equipos eléctricos tienen un costo de mantenimiento 10 a 15% más bajo en relación con los equipos diésel. Los equipos diésel generalmente son elegidos porque en el lugar de trabajo no se cuenta con adecuada infraestructura eléctrica o cuando se necesita

que la máquina vaya montada sobre un camión para poder desplazarse con mayor facilidad y rapidez.

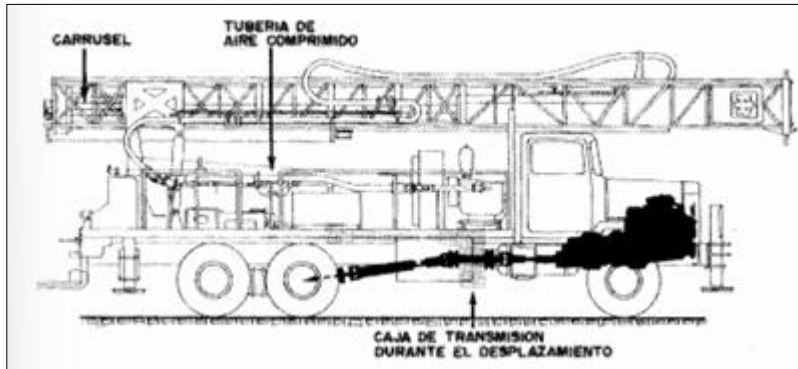
Un reparto promedio de la potencia que tienen instaladas las perforadoras eléctricas puede ser el siguiente:

- Movimiento de elevación y traslación: 18%
- Rotación: 18%
- Empuje: 3%
- Nivelación: 2%
- Captación de polvo: 3%
- Barrido y limpieza del detritus con aire comprimido: 53%
- Equipos auxiliares: 3%

En el caso de perforadoras accionadas con diésel, esto se puede efectuar con el mismo motor del camión que la transporta o con un motor independiente. Actualmente, es más usada la segunda configuración, debido a las características de los motores que necesitan los equipos.

Figura 3

Esquema de acción de una perforadora diésel con un motor único



Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

c) Sistemas de rotación

Con la finalidad de hacer girar las barras y transmitir el par, las perforadoras tienen montado un sistema de rotación en la mayoría de los casos sobre un bastidor que se desliza a lo largo del mástil de la perforadora.

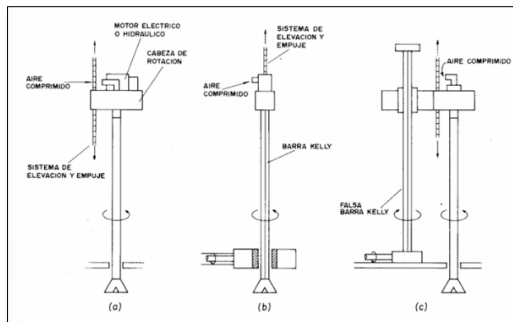
El sistema de rotación directo puede estar compuesto por un motor hidráulico o un motor eléctrico. El segundo, es el más empleado en las máquinas grandes, debido a que aprovecha de mejor manera la gran facilidad de regulación de los motores que tienen corriente continua, con un intervalo de 0 a 100 rpm. En los diseños de las perforadoras más antiguas se usaba el sistema Ward Leonard y en los más modernos se emplean thyristores o rectificadores en estado sólido.

El sistema hidráulico consiste en un circuito cerrado con una bomba de presión constante y un convertidor de par con el que se consigue variar la velocidad de rotación que tiene el motor hidráulico, situado en la cabeza de la columna o sarta de perforación. Este tipo de sistema es muy empleado en los equipos pequeños y medianos.

Los sistemas mecánicos o indirectos son el llamado Mesa de Rotación, el cual es muy popular y empleado en el campo de la industria petrolera pero muy poco utilizado en las máquinas de la industria minera. También existe el llamado Falsa Barra Kelly, donde se usa una falsa barra Kelly entre la sarta de perforación y la barra Kelly real, la cual es una barra metálica larga que se encuentra en la parte superior de la sarta de perforación.

Figura 4

Sistemas de Rotación: Directo (a), Mesa de Rotación (b) y Falsa Barra Kelly (c)



Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

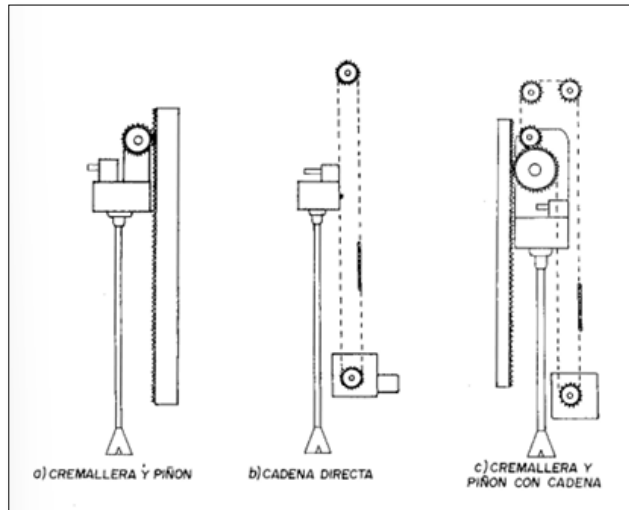
d) Sistemas de empuje y elevación

Para poder obtener una buena velocidad de penetración en la roca es necesario tener un determinado empuje que depende tanto de la resistencia del macizo rocoso como del diámetro del taladro que se pretende perforar. Como el peso de las barras no es suficiente para tener la carga necesaria, se tiene que aplicar fuerzas adicionales que son transmitidas casi siempre haciendo uso de energía hidráulica.

Existen básicamente cuatro sistemas. Los tres primeros son: Cremallera y Piñón directo (a), Cadena Directa (b) y Cremallera y Piñón con Cadena (c).

Figura 5

Sistemas de elevación y empuje



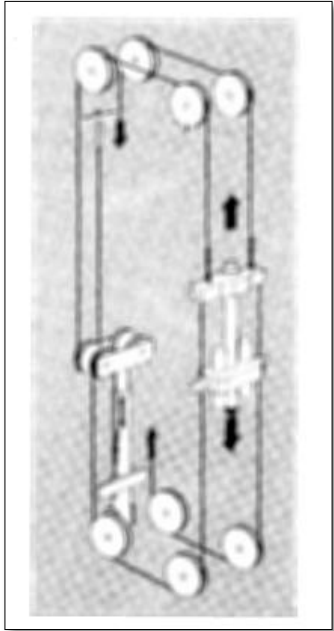
Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

Los modelos de perforadoras que tiene la mina superficial del presente estudio emplean el sistema de cremallera y piñón, el cual es un mecanismo lineal – rotativo que transforma el movimiento rotatorio del motor eléctrico del equipo en un movimiento lineal. Este sistema es clave para poder mover el cabezal o carro de rotación del equipo hacia arriba o hacia abajo del mástil.

El cuarto sistema es el Cilindro Hidráulico, el cual está compuesto por uno o dos cilindros que son accionados hidráulicamente. Sus ventajas son: poco peso, absorción de impactos, indica el nivel de desgaste o fatiga y es fácil de ser reemplazado o ajustado.

Figura 6

Sistemas de empuje por Cilindro Hidráulico



Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

Estos mecanismos de empuje permiten, además de proporcionar un esfuerzo de empuje perfectamente controlado, izar las barras de acero que componen la columna o sarta de perforación.

El peso del total de la máquina actúa como reacción contra el empuje aplicado a la boca, en lo cual se deduce que el peso de la perforadora debe ser superior y normalmente el doble de la carga máxima que se pretende obtener.

Las velocidades de elevación que alcanza la sarta de perforación suelen ser de 18 a 21 metros por minuto, no se recomienda exceder de dichos valores debido a que se podrían tener problemas con las vibraciones que se generan.

e) Mástil y cambiador de barras

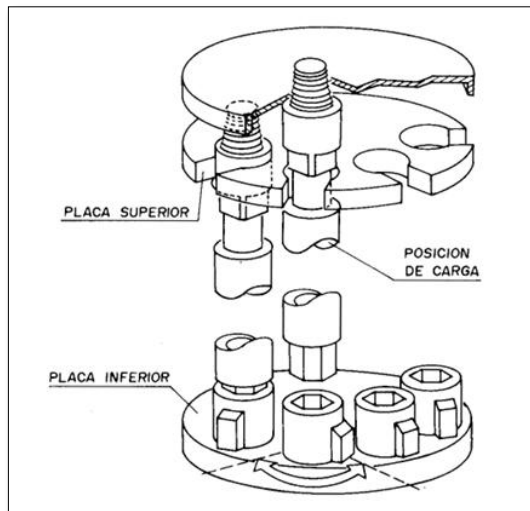
La estructura del mástil, el cual soporta las barras y el cabezal de rotación, debe estar diseñada para aguantar las flexiones ocasionadas por el peso, el esfuerzo de empuje y las tensiones generadas por el par de rotación. Los diseños más comunes han sido de tipo reticular y de sección normal o tubular. Las perforadoras modernas tienen una estructura de vigas tipo cajón que permiten el uso de mayores longitudes de mástil y la aplicación de altos pares de rotación.

Los mástiles suelen ser abatibles mediante cilindros hidráulicos o tubos telescópicos, debido a que para realizar los traslados del equipo es importante bajar el centro de gravedad de la máquina. El tiempo de elevación del mástil del equipo es de aproximadamente 2 a 5 minutos.

Las perforadoras de la mina superficial del presente estudio usan un cambiador de barras tipo revólver o carrusel, el cual es un sistema automático de almacenamiento y manejo de barras de perforación y es llamado así porque su estructura y funcionamiento es parecido al tambor giratorio de un arma de fuego tipo revólver.

Figura 7

Cambiador de barras tipo revólver o carrusel



Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

f) Cabina de mando

La cabina de mando es un lugar climatizado y presurizado, el cual contiene todos los controles e instrumentos requeridos en las maniobras del equipo durante el proceso de perforación. Normalmente está ubicada cerca del mástil, lo cual permite observar todos los movimientos realizados con los barrenos y aceros de perforación durante el trabajo.

g) Sistema de evacuación del detritus

El aire comprimido cumple las siguientes funciones en el proceso de perforación:

- Enfriar y lubricar los cojinetes de la broca
- Limpiar el fondo del barreno

- Elevar el detritus con una velocidad de ascensión adecuada

El aire transita por un tubo desde el compresor ubicado en la sala de máquinas, al mástil y de éste, por manguera flexible protegida, hacia el cabezal de rotación, desde donde pasa al interior del barreno que lo conduce hasta la boca, saliendo entre los conos para producir la remoción de los detritus elevándolos hasta la superficie. Si los trozos de roca son grandes y el caudal de aire no es el suficiente estos vuelven a caer al fondo, produciéndose su remolienda hasta alcanzar el tamaño adecuado para que puedan ascender. La falta de aire produce un consumo de energía innecesario, una menor velocidad de penetración y un mayor desgaste de la boca. Por el contrario, si la velocidad de ascensión es muy alta se elevan los desgastes en el centralizador y en las barras de perforación.

2.2.2. Columna o sarta de perforación

Es un conjunto de componentes y herramientas empleadas para ejecutar el proceso de perforación en el terreno, con el propósito de obtener muestras geológicas, realizar exploraciones y extraer minerales u otros recursos del subsuelo.

Los elementos que conforman la columna de perforación son componentes cuyo valor representa una parte significativa del costo total del equipo de perforación. Por ello, su adecuada durabilidad y rendimiento determinan si la inversión realizada por la empresa se recupera a través del desempeño obtenido o, por el contrario, genera pérdidas.

Mantener una correcta lubricación en los hilos que conectan las barras de perforación es fundamental para prolongar la vida útil de estos componentes. Es importante destacar que únicamente los hilos machos (pin) de los adaptadores deben ser engrasados, mientras que los hilos hembra (box) no deben lubricarse. Esto se debe a que el flujo de aire impulsa los hilos hembra hacia la parte inferior de la columna, y si estos se engrasan, podrían generarse obstrucciones en las toberas responsables de refrigerar y lubricar las brocas.

En la tabla 2, se muestra la marca y cantidad de perforadoras que tiene la mina superficial del presente estudio. En la figura 8, se muestra la columna de perforación que se usan en dichos equipos.

Tabla 2

Flota de perforadoras primarias

Marca	Cantidad	Código
BUC 49RIII	2	DR 4,5
BUC 49HR	3	DR 7,8,9
CAT MD6640	2	DR 12,18
P&H 320XPC	5	DR 11,16,17,19,21

Fuente: Elaboración propia

Figura 8

Columna de perforación de las perforadoras rotativas de la mina



Fuente: Elaboración propia

a) Amortiguador o shock absorber

Es un componente diseñado para reducir las vibraciones y los impactos generados durante el proceso de perforación. Al trabajar en formaciones o rocas de alta dureza, los diferentes accesorios de perforación, como las brocas tricónicas, pueden enfrentar resistencias significativas, lo que produce golpes y vibraciones a lo largo de toda la columna de perforación.

El objetivo principal del amortiguador es proteger tanto a la perforadora como a todas las herramientas y accesorios que intervienen en el proceso de perforación. Al

absorber parte de la energía generada por los impactos y vibraciones, este componente contribuye a prolongar la vida útil de la maquinaria y de los elementos de perforación, disminuyendo los costos de mantenimiento y optimizando el desempeño del proceso de perforación primaria.

Los amortiguadores utilizados en la columna de perforación pueden presentar distintos diseños y principios de funcionamiento; sin embargo, todos ellos están concebidos para resistir las exigentes y variables condiciones operativas propias de la industria minera.

El buen diseño de este componente es muy importante, donde se debe considerar un elemento de amortiguación principal dentro de su estructura para que pueda minimizar los golpes, choques y vibraciones que puedan generar daño al equipo y afectar el proceso de perforación.

Si usamos un amortiguador defectuoso o en mal estado, podríamos tener las siguientes consecuencias:

- Daños en las patas de los triconos, rotura de insertos, daño en los rodamientos, lo que podría significar una muerte prematura de nuestra broca.
- Deterioro del castillo de la perforadora y desgaste en las soldaduras de las conexiones.

- Desalineación de la columna de perforación, lo que podría generar altas vibraciones en la cabina de mando.

Figura 9

Amortiguador modelo KING COBRA



Fuente: UTEX

b) Adaptador superior o top sub

Es un accesorio situado en la parte superior de la columna de perforación. Se trata de una pieza de conexión que se coloca en la parte superior del tren de barrenos o de los tubos de perforación, con el propósito de facilitar el manejo, la conexión y garantizar la seguridad durante el proceso de perforación.

Sus principales funciones son:

- Proporciona una conexión segura entre la columna de perforación, la broca y los demás accesorios instalados en el extremo inferior. Su función principal es garantizar la integridad de la unión a lo largo de toda la columna, evitando desprendimientos o desconexiones durante el proceso de perforación.
- Durante el proceso de perforación se aplican presión y torque suficientes para generar la rotación de la broca en el fondo del pozo. El top sub cumple la función de transferir de manera eficiente la energía de rotación y torsión desde la columna de perforación hacia la broca, y posteriormente al terreno que está siendo penetrado.
- Facilita la elevación y maniobrabilidad de la columna de operación durante los procesos de subida y bajada de esta en el pozo. También brinda un punto de agarre seguro para las grúas y equipos de manipulación de aceros de perforación, lo cual es importante para que dichas operaciones puedan ser seguras.
- Al mantener una conexión firme entre las barras y la broca, el top sub contribuye a prevenir daños y desgastes prematuros tanto en la perforadora como en los demás accesorios de perforación, asegurando un funcionamiento más estable y prolongando la vida útil del equipo.
- Funciona como un elemento de desgaste, evitando daños prematuros en los hilos de los amortiguadores.

Tanto la columna de perforación como los demás componentes, son elaborados con aceros muy resistentes. Por lo tanto, se debe evitar aplicar soldaduras, ya que el

calentamiento excesivo en las áreas de unión del amortiguador y el top sub pueden provocar distintos cambios en las propiedades del acero, lo cual podría verse reflejado en una disminución de las propiedades mecánicas de dichos aceros.

Tabla 3

Características de los adaptadores superiores de la mina superficial

Marca	Diámetro exterior	Modelo
AGECOMET	9 1/4"	Pin Box * 30"
	10 3/4"	Pin Box * 22"

Fuente: Elaboración propia

c) Barrenos de perforación

“Los barrenos de perforación son herramientas empleadas para realizar perforaciones en el terreno con el propósito de extraer minerales o rocas de interés económico. Estas perforaciones resultan fundamentales en los procesos de exploración y extracción de recursos naturales, ya que permiten acceder a yacimientos subterráneos que contienen minerales valiosos”. (Herrera, 2020)

Son tubos de acero de alta resistencia utilizados para perforar el terreno y las rocas mineralizadas. En la industria minera existen diversos tipos de barrenos de perforación, cuya selección depende tanto de las características del terreno o macizo rocoso como del método de extracción que se pretenda emplear. Los más comunes son:

- Barrenos de diamante: Se usan para perforar rocas duras, tienen una corona de diamantes en su extremo, lo que facilita que corten los materiales más resistentes.
- Barrenos de martillo de fondo (DTH – Down the hole): Se emplean para la perforación de formaciones rocosas duras. Están equipados con una cabeza de perforación provista de botones de carburo de tungsteno, los cuales impactan sobre la roca para fracturarla y desintegrarla durante el proceso de perforación.
- Barrenos de aire reverso: Se usan para perforar rocas blancas o terrenos no compactos. El aire bombea a través del interior del barreno para poder mantener limpio el hueco y conducir el detritus hacia la superficie.
- Barrenos de núcleo: Se utilizan cuando es necesario obtener testigos de roca intacta con el fin de realizar análisis geológicos detallados.
- Barrenos de perforación rotativa: Se emplean para la perforación de pozos de mayor profundidad, en los cuales se acopla una broca en el extremo de la barra y se aplica un movimiento de rotación para generar el orificio en el terreno.

Los barrenos también son denominados elementos de extensión y conexión, ya que se encargan de transmitir la energía de rotación y la fuerza de empuje desde la parte superior de la columna de perforación hasta la broca. A su vez, internamente facilitan el flujo de aire necesario para eliminar los detritus desde el fondo de la columna hacia la superficie.

Sus longitudes, dimensiones, diámetros y tipo de hilos son elaborados de acuerdo al tipo de perforadora donde serán usados.

Las barras de perforación están diseñadas para trabajar en condiciones extremas y severas. Cada barra tiene un código de serie de identificación única para poder hacerle seguimiento durante su tiempo de vida útil, lo cual es evaluado posteriormente para analizar posibles mejoras en los siguientes diseños.

El diseño del barreno requiere un cilindro tubular con una rosca macho y otra hembra en sus extremos. Además, los barrenos son diseñados con un espesor de pared específico de acuerdo a la dureza del macizo rocoso, mientras mayor sea la dureza de la roca mayor será el espesor de la pared, debido a que se tendrá una mayor resistencia a las fuerzas de compresión.

Tabla 4

Características de los barrenos de la mina superficial

Marca	Diámetro	Modelo
AGECOMET	9 1/4"	Pin.Pin * 32ft
		Box.Box * 32ft
	10 3/4"	Pin.Pin * 32ft
		Box Box * 32ft

Fuente: Elaboración propia

d) Guiador o deck bushing

Es el componente encargado de guiar la columna de perforación para asegurar que el corte hacia el macizo rocoso sea completamente vertical y sin desviaciones. Es uno de los componentes principales de toda la columna de perforación, su costo es bajo pero si no realiza correctamente su trabajo podríamos tener daños mayores en los demás componentes.

Entre las principales causas de su desgaste están los impactos que recibe la perforadora y toda la columna cuando el terreno que está siendo perforado es muy duro.

Cuando esto sucede, las barras son sometidas a una fuerza muy elevada de empuje, lo cual genera un pandeo en toda la columna y junto a la rotación y vibraciones causan impactos considerables y daños en el deck bushing.

El monitoreo del desgaste del guiador se efectúa en el buje interno, recomendándose mantenerlo dentro de un rango menor a media pulgada por cada lado. Algunas marcas de deck bushing traen una marca límite de desgaste de fábrica, lo cual indica que al sobrepasar dicha marca de desgaste se ha cumplido con la vida útil del guiador.

Tabla 5

Características de los guidores de la mina superficial

Marca	Diámetro	Modelo
	9 1/4"	DEC 16
AGECOMET	10 3/4"	DEC 16
		DEC 17

Fuente: Elaboración propia

e) Reamer o bit sub

Es un componente cilíndrico ubicado en la parte inferior de la columna de perforación, conectado directamente a la broca. Su función principal es transmitir el movimiento de rotación desde la perforadora hasta la broca tricónica, permitiendo el corte y la fragmentación del macizo rocoso.

Su estructura generalmente presenta una rosca en la parte superior para conectarse con el barreno y otra en la parte inferior para unirse con la broca, lo que facilita el montaje y desmontaje de los componentes de la columna de perforación.

Debido a que está en el fondo del hueco que está siendo perforado, está siempre expuesto a mayores condiciones de desgaste provocadas por la abrasividad del terreno. En algunos diseños se usan recubrimientos especiales contra la abrasividad de la roca para poder proteger el acero del desgaste provocado por la erosión y fricción del macizo rocoso.

Tabla 6

Características de los reamers de la mina superficial

Marca	Diámetro	Modelo
AGECOMET	9 1/4"	Pin Box * 40"
	10 3/4"	Pin Box * 40"

Fuente: Elaboración propia

f) Broca o tricono

Es una herramienta especial utilizada en la perforación de agujeros en el macizo rocoso o en el terreno. Son comúnmente utilizadas en los procesos de exploración y extracción de minerales, petróleo, gas, agua y otros recursos naturales.

Está constituido principalmente por conos, que actúan como elementos cortadores; rodamientos y el cuerpo o matriz de la broca. En otras palabras, los conos son los principales responsables del proceso de perforación del macizo rocoso.

Los insertos del tricono están hechos de carburo de tungsteno, la cual es una aleación de tungsteno y cobalto. Se encuentran distribuidos en forma de hileras, para poder mejorar la eficiencia de la perforación de la roca.

Para poder garantizar una mayor vida útil de la broca, el diseño de los rodamientos debe ser capaz de resistir altas fuerzas radiales y axiales que estarán presentes durante el proceso de perforación.

Tabla 7

Características de las brocas de la mina superficial

Marca	Diámetro	Modelo
TERELION	11"	RB67
	12 1/4"	RB67G
RYDER	11"	CN71
EPIROC	12 1/4"	EH72

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Velocidad de penetración

Es el resultado de:
$$\frac{\text{Distancia total recorrida de la broca (m)}}{\text{Tiempo total de uso de la broca (hr)}}$$

Para aumentar la velocidad de penetración de manera eficiente y segura, se deben usar correctos parámetros de perforación para poder aprovechar el máximo rendimiento posible de la broca sin dañarla, lo cual nos permitirá para poder reducir el tiempo total de perforación, en otras palabras, perforar la misma cantidad de metros, pero en menos tiempo.

El ajuste de parámetros de perforación debe seguir las siguientes recomendaciones:

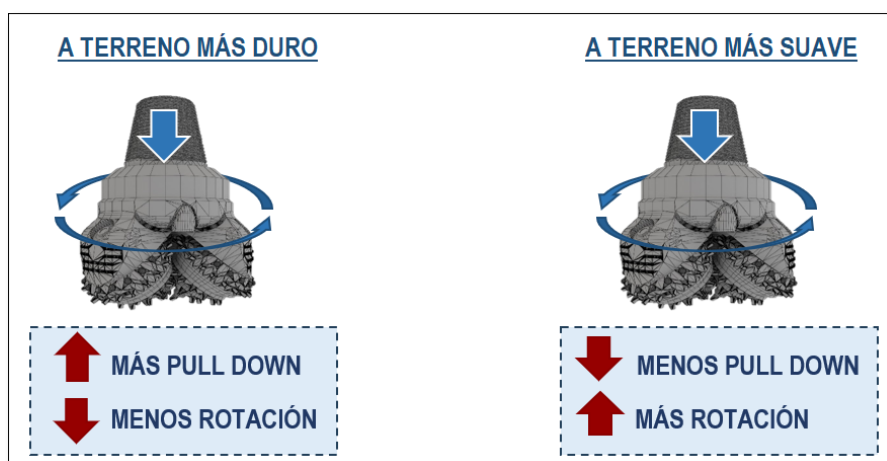
- Los parámetros de perforación no deben exceder los valores recomendados porque se estaría dañando la broca tricónica y por ende se estaría reduciendo su vida útil.

- Los parámetros de perforación no deben estar por debajo de los valores recomendados porque no se estaría aprovechando el máximo rendimiento que podría tener la broca tricónica.

El factor geológico está directamente ligado al aumento de la velocidad de penetración. Para lo cual se maneja el siguiente concepto base:

Figura 10

Parámetros de perforación según el tipo de terreno



Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Costo total de perforación (TDC)

Es el resultado de:
$$\frac{\text{Costo la broca } (\$)}{\text{Total de metros perforados}} + \frac{\text{Costo horario del equipo } \left(\frac{\$}{h}\right)}{\text{Velocidad de penetración } \left(\frac{m}{h}\right)}$$

En el punto 2.2.3 se ha descrito la influencia que traería reducir la velocidad de penetración de la broca. El presente trabajo de investigación demostrará la relación estadística que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación.

El costo de la broca es un parámetro que no podemos manejar. A continuación, se detallan los costos por marca de perforadora que intervienen en el cálculo del costo horario del equipo por, el cual es brindado por el área de Ingeniería Mina todos los fines de mes para el cierre correspondiente:

Tabla 8

Detalle de costo horario máquina de Diciembre - 2024

FECHA: DICIEMBRE 2024					
EQUIPO	C O S T O S				
	MANO DE OBRA	OPERACION	MANTENIMIENTO	DEPRECIACION	TOTAL
(5) Perf. BE 49HR	187,034	374,735	288,634	103,836	954,238
(2) Perf. BE 49RIII	93,183	161,794	109,132	2,554	366,662
(1) Perf. QUBEX DR560	-	133,988	39,257	8,346	181,591
(3) Perf. QUBEX DR580	-	354,288	152,669	15,963	522,919
(5) Perf. P&H 320XPC	264,333	351,680	488,139	181,002	1,285,154
(1) Perf. LEOPARD DI650i	-	95,016	37,011	16,940	148,966
TOTAL	544,549	1,471,500	1,153,296	328,641	3,497,986

Fuente: Área de Ingeniería Mina (2024)

2.2.5. Parámetros de perforación

a) Presión de broca o Pulldown

El pulldown es una fuerza vertical descendente, la cual siempre es constante y su valor máximo varía según la ficha técnica de cada proveedor de brocas tricónicas. Se transfiere a través de la columna de perforación, donde los insertos de carburo de tungsteno de la broca son los que generar la compresión a la roca y al mismo tiempo van rotando para poder romper y fatigar la roca.

Luego de que la presión ejercida supera a la resistencia a la compresión del macizo rocoso, los insertos de la broca lo penetran, provocando que trozos de roca se desplacen lateralmente.

Tabla 9

Fuerza de empuje límite según el diámetro de la broca

DIAMETRO DEL TRICONO (pulg.)	EMPUJE LIMITE (libras)
5 ¹ / ₈	21.000
6 ¹ / ₄	31.000
6 ³ / ₄	37.000
7 ⁷ / ₈	50.000
9	65.000
9 ⁷ / ₈	79.000
12 ¹ / ₄	121.000

Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

b) Velocidad de rotación (RPM)

La velocidad de penetración son las revoluciones por minuta que hace la columna de perforación, cuando gira la broca también giran sus tres conos en el fondo del taladro, este movimiento permite que los dientes del tricono empiecen el contacto con el macizo rocoso, lo cual provocó la rotura y trituración de la roca por medio del empuje.

El descentrado o pequeña desviación de los ejes de rotación de los conos de broca permite que los insertos realicen un arrastre cuando rotan en terreno suave.

Tabla 10

Velocidad de rotación recomendada según el tipo de roca

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE ROTACION (r.p.m.)
Blanda	75 - 160
Media	60 - 80
Dura	35 - 70

Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

c) Presión de rotación

El torque o presión de rotación es una medida de fuerza que ejerce el tricono, la cual es provocada por el pulldown o fuerza de empuje y la velocidad de rotación hacia el fondo de un taladro.

d) Presión del aire (PSI)

La presión de aire es el flujo de aire producido por el compresor que tiene instalado cada perforado en su sala de máquinas, el cual se dirige a la columna de perforación e ingresa a la broca a través de los conductos internos, en la cual aplica presión y por la misma fuerza del aire expulsa los detritos a través de las boquillas o nozzles. Su unidad de medida es libra fuerza por pulgada cuadrada, en inglés PSI – Pound-force per square inch.

Las velocidades de evacuación el detritus en función del tipo de roca, son las siguientes:

Tabla 11

Velocidades de evacuación de detritus

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD MINIMA		VELOCIDAD MAXIMA	
	(m/min)	(pies/min)	(m/min)	(pies/min)
Blanda	1.200	4.000	1.800	6.000
Media	1.500	5.000	2.100	7.000
Dura	1.800	6.000	2.400	8.000

Fuente: Manual de Perforación y Voladura, López Jimeno (2003)

2.2.6. Propiedades físicas de las rocas

Las propiedades físicas son un conjunto de características que permiten describir el comportamiento de la roca en función de la estructura interna que presenta, su composición mineralógica y su comportamiento frente a factores ambientales. Es importante para comprender de qué forma va a interactuar con el proceso de perforación primaria, algunas de las propiedades físicas más importantes son:

a) Densidad

Se define como la masa por unidad de volumen de la roca, a su vez se encuentra relacionado con su grado de porosidad y composición mineralógica. Las rocas más densas son más resistentes a los distintos esfuerzos mecánicos, es decir, son más difíciles de fracturar y romper.

b) Porosidad

La porosidad es el volumen de espacios vacíos que existen dentro del macizo rocoso, los cuales no se encuentran ocupados por minerales. Es un factor fundamental para evaluar el grado de permeabilidad de las rocas, ya que influye en la forma en que los fluidos se transportan en el interior de las rocas a través de grietas o fracturas existentes.

c) Resistencia a la compresión

Básicamente es la capacidad que tiene la roca para aguantar fuerzas de compresión antes de romperse. Es una de las propiedades más importantes para la perforación y voladura de rocas.

d) Resistencia al corte

Es la capacidad que tiene una roca para resistir los esfuerzos cortantes que son producidos por la pala durante el proceso de fracturación de la roca. Esta propiedad influye directamente en la forma de perforación y en el tipo de minado que se va a realizar.

e) Elasticidad

Se define como la capacidad que tiene el macizo rocoso para deformarse y luego regresar a su forma original cuando se aplican fuerzas de tensión o compresión. Las rocas más elásticas son las más fáciles de trabajar durante los procesos de perforación y carguío.

f) Plasticidad

Es la capacidad que tienen las rocas para deformarse cuando se encuentran sometidos a esfuerzos de tensión o compresión. Principalmente depende de la

composición mineralógica de la roca, disminuye cuando hay mayor cantidad de cuarzo, feldespatos y otros minerales duros.

g) Abrasividad

Se define como la capacidad que tienen las rocas para desgastar la superficie de otro cuerpo más duro con el que hace contacto. Se eleva según la dureza, forma y tamaño de los granos. Esta propiedad influye directamente en la duración de los aceros de perforación, mientras más abrasiva sea la roca los aceros se desgastarán más rápido.

h) Fracturabilidad

Es la tendencia que tienen las rocas a romperse bajo ciertas condiciones del esfuerzo aplicado en ellas. Se mide en el campo a través de la FF (frecuencia de fracturamiento), la cual es determinada usando parámetros ya establecidos donde se determina el número de fracturas que tiene la roca.

i) Conductividad térmica

Mide la capacidad que tiene la roca para transferir calor. Es mucho más importante en yacimientos mineros que se encuentran cerca a fuentes muy elevadas de calor.

2.3. Definiciones conceptuales

- Área de perforación: Es aquella zona delimitada y señalizada donde se realizan los trabajos de perforación.

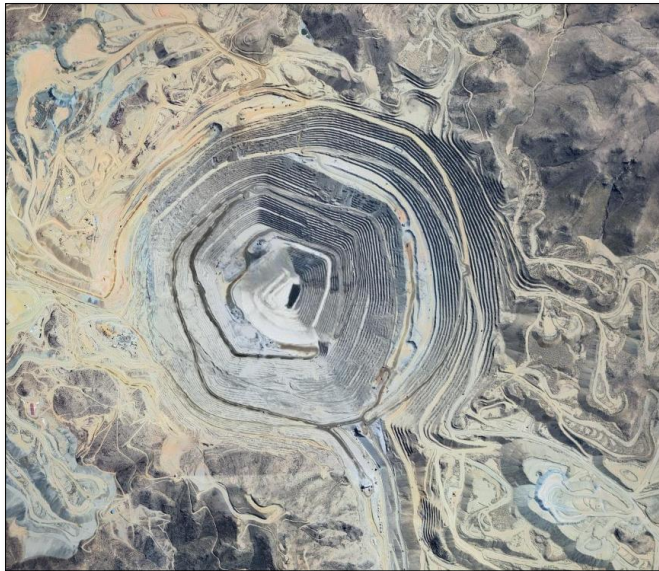
- Banco: Son cortes horizontales que se encuentran en los distintos niveles de la mina. En la mina superficial del presente estudio tienen un ángulo de 65° y una altura de 15 m.
- Cresta: Es el límite superior de un banco.
- Detritus: Son partículas pequeñas de roca producto de la rotura de la misma, son expulsadas hacia la superficie gracias al sistema de evacuación de la broca. Comúnmente es usado como taco para los taladros cargados para la voladura.
- Explosivo: Es aquel material líquido o sólido que, cuando explota, libera gran cantidad de energía en forma de calor y ondas de choque.
- Falla: Son deslizamientos producidos por la fractura del terreno, donde se desplazan dos bloques generalmente debido a los esfuerzos tectónicos.
- Fragmentación: Es la rotura de la roca que se produce por las ondas expansivas generadas por los explosivos durante una voladura.
- Ley de corte: Es el grado mínimo que se necesita para obtener un mineral o un metal de determinada calidad. También se llama cut off.
- Malla de perforación: Es la ubicación geométrica de los huecos o taladros distribuidos según el diseño de perforación elaborado por el área de ingeniería.
- Perforista: Es aquella persona debidamente capacitada que se encarga de operar la perforadora.

- Perforación: Es el proceso primario del ciclo de minado, el cual consiste en realizar pozos o huecos con los parámetros y características ya definidos anteriormente.
- Seguimiento del desgaste de aceros: Es un procedimiento que se realiza en cada uno de los aceros de las perforadoras, con la finalidad de evaluar la vida útil y el performance que están teniendo estos mismos.
- Taladro: Es un agujero cilíndrico, el cual es producto del proceso de perforación, en el cual se irá depositando la carga explosiva diseñada anteriormente para la voladura.
- Toe: Es el límite inferior de un banco.

2.4. Generalidades de la mina superficial del Estudio

Figura 11

Imagen satelital de la mina superficial



Fuente: Google Earth (2025)

2.4.5. Ubicación y acceso

La mina superficial se encuentra ubicada en el sur del Perú, en el departamento de Tacna y tiene una altitud entre 3100 y 3600 m.s.n.m. La zona es montañosa y semidesértica, donde las precipitaciones anuales son de 80 mm y la tasa de evaporación es de 1500 mm.

Hacia el noroeste limita con los yacimientos mineros de Quellaveco y Cuajone, a una distancia de 20 a 30 kilómetros respectivamente. La mina superficial tiene una topografía accidentada, con una serie de quebradas profundas que tienen su origen en las montañas y cruzan hacia los desiertos costeros atravesando el flanco occidental de los Andes del suroeste.

2.4.6. Ubicación política

- Distrito: Ilabaya
- Provincia: Jorge Basadre
- Departamento: Tacna

2.4.7. Ubicación geográfica

La mina superficial tiene las siguientes coordenadas: UTM 294400 este y 8098819 norte. Se encuentra a una altitud de 3100 a 3600 metros sobre el nivel del mar. Su latitud es de 17 grados y 13 minutos al sur y su longitud es de 70 grados y 36 minutos al oeste.

Figura 12

Ubicación de la mina superficial



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.8. Geología local y regional

La región donde se encuentra ubicado el yacimiento ha experimentado un período extremadamente intenso de actividad ígnea, se estima que eso ocurrió hace aproximadamente 70 millones de años durante el Cretácico-Terciario. En dicho período ocurrieron erupciones de magmas riolíticos y andesíticos, como resultado de estos eventos se generó la emisión de material volcánico en grandes volúmenes, los cuales con el tiempo se fueron acumulando en capas de lava. Estas capas están compuestas por una alternancia de derrames de riolita, andesita y aglomerados, las cuales se superpusieron una encima de otra hasta alcanzar 1500 metros de espesor total. Todas estas formaciones se encuentran inclinadas ligeramente hacia el oeste y conforman lo que se conoce como el grupo Toquepala.

Culminando la etapa de actividad volcánica, esta región experimentó varias fases de intensa erosión. Los cambios en el nivel del agua subterránea influenciaron a estas fases de erosión, lo que generó que los minerales de la parte superior de la zona rica en minerales sean lavados y lixiviados. Como resultado, en las capas más profundas de la tierra se acumularon minerales de cobre, creando la zona secundaria de enriquecimiento.

Un dato fundamental es que en el área de la mina superficial no se han identificado capas de material volcánico recientes, lo que refleja que no ha habido actividad volcánica reciente en la región.

Figura 13

Geología de la región de Tacna



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.9. Geología

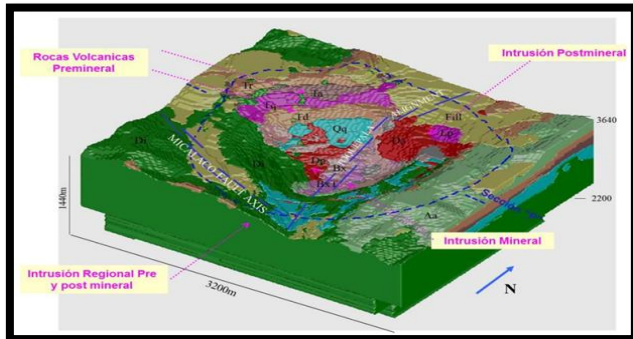
La mina superficial corresponde a un pórfido diseminado de cobre y molibdeno. La mineralización se originó a partir de una chimenea de brecha y un intrusivo de dacita, ambos asociados a una actividad hidrotermal intrusiva de naturaleza calco-alcalina, ocurrida entre finales del Cretácico Superior y comienzos del Terciario Inferior.

El depósito de la mina superficial se encuentra asociado a los yacimientos de Cuajone y Quellaveco, formando parte del área metalotectónica conocida como la Subprovincia Cuprífera del Pacífico. Esta zona presenta una orientación NW-SE en el territorio peruano y N-S en el chileno, concentrando importantes recursos cupríferos de relevancia económica.

Desde el punto de vista económico, se procesan minerales sulfurosos de cobre, principalmente calcopirita, bornita y calcosita. El tratamiento de estos minerales se realiza mediante procesos de concentración y lixiviación, con leyes de corte de 0,40 % y 0,10 % de contenido de cobre, respectivamente. Como subproducto del proceso de concentración del cobre se obtiene molibdenita.

Figura 14

Geología de la mina superficial



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.10. Litología de los depósitos

Los botaderos de desmote están conformados principalmente por rocas volcánicas estériles, las cuales se localizan en la parte superior de la mina. En la columna estratigráfica están clasificados en la serie alta y la serie Toquepala.

Tienen las siguientes características petrográficas:

- a) La Alta Andesita (Aa) es una formación de rocas andesíticas que se encuentra ubicada en la pared este de la mina. Se compone de aglomerados y andesitas intercalados, los cuales se presentan en forma de enclaves volcánicos. Tiene una textura que varía entre afanítica y porfídica y frecuentemente muestran una apariencia fluidal. No posee minerales metálicos económicamente importantes, contiene porcentajes de Cu, S, Fe, MoS₂ y Ca.
- b) La Riolita Toquepala (Tr) es una roca volcánica que se distingue por presentar bandas de flujo. Está compuesta por fenocristales de feldespato inmersos en una matriz fina de cuarzo, con presencia ocasional de turmalina. Su color varía entre

tonalidades grises, marrones y blancas, y en algunas áreas se observan trazas dispersas de pirita.

- c) La Andesita Toquepala (Ta) posee un matiz verde oscura con una textura afanítica. Generalmente se presente densa y, en algunas zonas, muestra un flujo bandeado. Tiende a fracturarse con facilidad, en especial cuando se encuentra alterada. Esta roca tiene presencia limitada de pirita.
- d) El Pórfido Cuarzífero Toquepala (Tq) es una roca derivada de la riolita, caracterizada por la presencia de fenocristales de cuarzo inmersos en una matriz de tonalidad marrón o blanca. Presenta predominantemente una textura afanítica, es de naturaleza sólida y suele encontrarse en grandes bloques. Los cristales de cuarzo varían en tamaño y disposición, y en algunas muestras se observa una ligera presencia de pirita cristalizada.
- e) Las Doleritas Toquepala (Td) corresponden a andesitas de grano medio a fino, de color verde, con propiedades melanocráticas y magnéticas. Su unidad principal está constituida por una andesita con matriz tufácea, en la que se intercalan capas de brechas volcánicas y aglomerados de composición similar. En algunas muestras se observan fenocristales de plagioclasa y feldespatos dentro de una matriz compacta, y ocasionalmente se presenta pirita diseminada en pequeños cristales.
- f) El Pórfido Cuarzífero Quellaveco (Qq) es una roca riolítica, la cual tiene una textura porfídica con un alto grado de fracturamiento. Tiene una masa densa, silificada y dura, con un color blanco lechoso, con presencia de cuarzo en pequeños fenocristales. Puede tener estructuras bandeadas y es muy quebradizo.

Es la roca más antigua de la mina superficial y tiene intrusiones de dacita y diorita porfídica.

- g) La Latita Porfídica (Lp) se encuentra en forma de diques inclinados y verticales. Tiene una textura porfídica, con presencia de feldespatos de plagioclasa y fenocristales de ortoclasa en una matriz fina.
- h) La Dacita Aglomerada (Da) es una roca de composición dacítica que presenta una coloración que varía desde blanco fresco hasta rosáceo en su superficie exterior. Está compuesta principalmente por cuarzo anhédrico y plagioclasa subhédrica. En la mina se encuentra con forma cilíndrica, incorporando fragmentos de andesita, brechas y otras rocas formadas durante el proceso de intrusión. Esta roca se caracteriza por contener cantidades reducidas de minerales.
- i) La Dacita Porfídica (Dp) tiene una textura porfídica con presencia de fenocristales en una matriz granulada y fina. Su color oscila entre marrón parduzco y blanco en fracturamientos frescos. Los cristales de biotita, plagioclasa, anfíbol y cuarzo presentan una textura anhédrica y subhédrica.
- j) La Dacita Porfídica (Dp) presenta una textura porfídica caracterizada por la presencia de fenocristales inmersos en una matriz de grano fino y aspecto granular. Su color varía entre tonalidades marrón parduzco y blanco en las zonas de fractura fresca. Los cristales de biotita, plagioclasa, anfíbol y cuarzo muestran texturas anhédricas y subhédricas.
- k) Las Brechas (Bx, Px) se agrupan en Brechas Angulares y Pebble Brecha. Las brechas angulares están compuestas por fragmentos angulares en una matriz de cuarzoturmalina y sulfuros. Las pebbles brecha son fragmentos redondeados en una matriz fina, con variados tamaños y cementación similar. Las brechas de

guijarros se describen como concreto recién fracturado y no contienen mineralización económica. (Superintendencia de Geología Mina, 2018)

2.4.11. Mineralogía

La mineralogía de la mina superficial se manifiesta de la siguiente forma:

- a) Zona de lavado: En esta región se identifican minerales como jarosita, limonita y goetita, los cuales se localizan en las fracturas presentes dentro del macizo rocoso.
- b) Zona de óxidos: En esta zona no se evidencia la presencia de minerales en estado de óxido.
- c) Zona de enriquecimiento secundario: En esta región se encuentran minerales como digenita, bornita, calcosina, cubelina, molibdenita, pirita y calcopirita. Estos minerales se distribuyen de manera diseminada y a lo largo del sistema de fracturas presentes en el interior del macizo rocoso.
- d) Zona primaria: En esta zona, se ha logrado identificar minerales como tetraedrita, molibdenita, bornita, calcopirita, galena y enargita. Se presentan en forma diseminada y ocupan el espacio vacío de las fracturas del sistema de stockwork.

2.4.12. Mineralogía de los depósitos

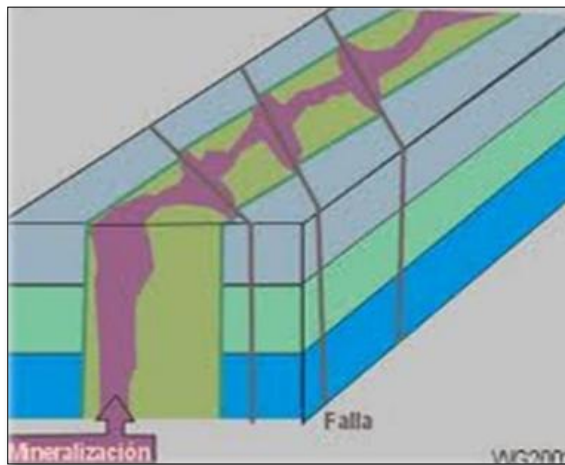
- a) La calcopirita (CuFeS_2) se muestra en el interior de la roca en forma de agregados masivos intactos, también como agregados mínimos en menor proporción. Dicho mineral rellena las grietas visibles de la brecha y también se presenta en óxidos de hierro que han surgido como resultado de la transformación de vetas delgadas. Cuando su contenido cuprífero es mayor a 0,4% tiene como destino final la planta concentradora.

- b) La calcosita (Cu_2S) se presenta en forma de masas, la cual cristaliza en áreas de mayor concentración. Su color plomo se expande a lo largo de fracturas finas en forma de vetas, especialmente en niveles superiores, teniendo como rocas encajonantes a la diorita, la andesita Toquepala y el pórfido cuarcífero Quellaveco. Si no existe una presencia considerable de óxidos, se dirige hacia la planta concentradora; caso contrario; se coloca en los pads de lixiviación.
- c) La covelina (CuS) se asocia con la calcosita, aunque en menor proporción. Se presenta en forma supergénica, recubriendo los sulfuros con su característico color azul marino. Su tratamiento metalúrgico es similar al aplicado a la calcosita.
- d) La turmalina ($\text{Al}_2\text{SiO}_9\text{Na}_3\text{B}_3\text{Al}_3(\text{O},\text{OH},\text{F})_4$) se presenta en forma de agregados masivos y actúa como un cemento dentro de la matriz de la brecha, donde incluye fragmentos angulares de cuarzo. Se considera un mineral no valioso cuando aparece en pequeñas cantidades, y cuando está presente en brechas volcánicas, su destino suele ser los botaderos de desmonte.
- e) La calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) se forma en pátinas, se encuentra asociada a los óxidos de hierro (limonitas), se presume que posiblemente sea resultado de los sulfuros de cobre en masa que han experimentado alteraciones moderadas. A veces, se relaciona con la sericita. A pesar de ser un óxido, tiene consecuencias negativas si es llevado a la planta concentradora, es por esta razón que es colocado en los pads de lixiviación.
- f) El cuarzo (SiO_2) se encuentra en dos formas: silificada en la roca producto de la alteración hidrotermal, y en cristales de tamaño muy pequeña que rellenan las cavidades de la roca, frecuentemente está asociada con sulfuros dispersos y, a veces, se encuentra intercalada con la bornita en agregados masivos.

g) Los óxidos de hierro, resultado de la alteración de algunos sulfuros como las hematites y jarositas, se encuentran en abundancia, a menudo mezclados con calcantita. Estos óxidos también llenan fracturas previamente ocupadas por sulfuros como la calcopirita y la pirita. Se desechan en montones de lixiviación y desechos. (Superintendencia de Geología Mina, 2018)

Figura 15

Mineralización en la mina superficial



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.13. Estructuras

Dentro de la tectónica regional de la mina superficial, esta pertenece al alineamiento NOSE, el cual tuvo origen desde el período cretácico superior hasta el terciario inferior. El lineamiento tectónico sigue una orientación paralela a la Cordillera de los Andes y se encuentra asociada a características geológicas específicas, como lo son el Alineamiento Toquepala y la Falla Micalaco.

Estos fenómenos tectónicos están directamente vinculados con el origen de las brechas y la formación de sistemas de fracturas tipo stockwork en zonas extensas donde

existe debilitamiento geológico. En conjunto, estos procesos dieron origen a las formaciones conocidas como breccia pipes o chimeneas de brechas.

Dentro del área del yacimiento, se ha podido identificar las fallas principales haciendo uso de la cartografía geológica. Las quebradas presentes en la topografía original del terreno coinciden con la presencia de estas fallas. Las fallas más relevantes son la Falla Yarito, la Falla Sargento y la Falla Toquepala, las cuales se caracterizan por presentar un alto ángulo de inclinación con respecto a la superficie terrestre.

Figura 16

El stockwork



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.14. Alteración

Las diversas rocas del subsuelo son afectas por cuatro tipos comunes de alteraciones geológicas:

- a) Alteración propilítica: Se caracteriza por tener presencia de minerales como pirita, calcita, clorita y epidota. Generalmente se encuentra presente en la diorita.
- b) Alteración argílica-supérgena: Los principales minerales afectados son el caolín y diversas variedades de arcillas. Este fenómeno se observa con mayor frecuencia en rocas volcánicas y en la diorita.
- c) Alteración filica: Los minerales afectados por esta alteración son la pirita, sericita y el cuarzo. Es muy común en intrusiones de brechas y dacita.
- d) Alteración filico-potásica: Es característica de minerales como la sericita, clorita y biotita, y además afecta a las intrusiones de brechas y dacitas.

En términos generales, casi todas las rocas del subsuelo, incluidas las intrusiones, han sido afectadas por algún tipo de alteración. No obstante, existen excepciones, como la dacita aglomerádica y los diques de latita porfídica, que muestran una menor susceptibilidad a estos procesos.

Figura 17

La diorita



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

Figura 18

La pirita



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

2.4.15. Características geológicas del tajo

Actualmente, el yacimiento presenta un diámetro aproximado de 3,5 kilómetros y una profundidad cercana a 1 kilómetro. Su estructura externa posee forma cónica con paredes verticales bien definidas. Se trata de un pórfido de cobre, conformado por una chimenea de brecha y un pórfido dacítico.

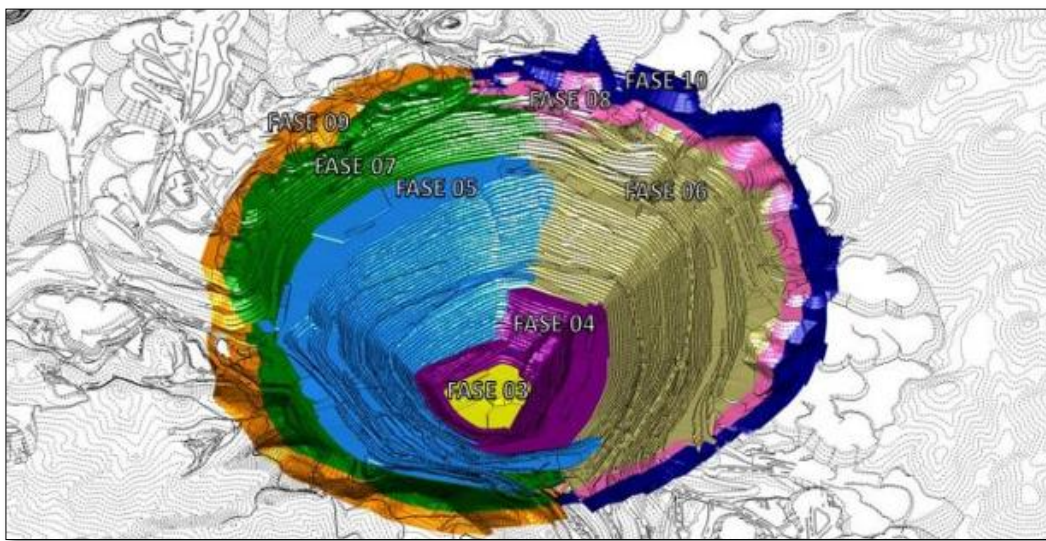
A lo largo del tiempo, el yacimiento ha experimentado procesos de erosión, oxidación y enriquecimiento secundario. La capa superficial, de aproximadamente 150 metros de espesor, está conformada por material afectado por procesos de lixiviación. Antes de iniciarse la etapa de explotación, se estimaba que el yacimiento contenía más de 150 millones de toneladas métricas (Mt).

Inicialmente, las reservas estimadas del yacimiento superaban los 400 millones de toneladas (Mt), con una ley de cobre del 1,00 %. Sin embargo, en la actualidad, estas se

han recalculado en 300 Mt, con un contenido promedio de cobre del 0,83 %. Hasta la fecha, se han extraído aproximadamente 558 Mt, con una ley promedio de 1,03 %. Gracias al método de explotación a cielo abierto, el yacimiento permite una operación de gran escala con costos relativamente bajos.

Figura 19

Diseño por fases de la mina superficial



Fuente: Trabajo de investigación de la SCC, Huisacayna et al., (2013)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de investigación

a) Tipo de investigación

El presente estudio es de tipo básico, ya que su finalidad principal es adquirir conocimientos haciendo uso de la observación de los hechos sin realizar ningún tipo de alteración en los datos recopilados, es decir, los resultados que se van obtener son a través del análisis de las muestras que se van a utilizar.

b) Nivel de investigación

El presente estudio es de tipo correlacional, debido a que tal como lo define Hernández (2014): “Tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular” (p.93), si relacionamos lo antes mencionado con nuestro estudio, se refiere a que queremos demostrar cual es el tipo de relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación (TDC) de las brocas tricónicas a lo largo del año 2024.

3.2. Diseño de la investigación

El presente estudio tiene un diseño no experimental, ya que, al tener un nivel correlacional, no tiene influencia en los fenómenos que son objeto de estudio, lo cual nos permite observar de forma natural la relación entre las variables de estudio que han sido presentadas.

Del mismo modo, también podemos caracterizar el presente estudio como longitudinal o evolutivo, debido a que tal como lo define Hernández (2014): “Se recolectan datos en diferentes momentos o períodos para hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias” (p.160), relacionando lo antes mencionado con nuestro estudio, quiere decir que el análisis será relacionado con los datos obtenidos de los meses de enero a diciembre del año 2024.

Finalmente, podemos caracterizar el diseño del presente estudio como longitudinal de tipo panel, tal como lo afirma Hernández (2014): “Los mismos casos o participantes son medidos u observados en todos los tiempos o momentos” (p.161), en nuestro estudio la muestra siempre será la cantidad de brocas que han sido consumidas, las cuales serán analizadas para evaluar la relación estadística de nuestras dos variables.

3.3. Población y muestra

a) Población

La población del presente estudio son las 1019 brocas tricónicas que fueron consumidas entre los meses de enero a diciembre del año 2024. Las brocas consumidas son de 11” y 12 ¼” de diámetro y pertenecen a las marcas Terelion, Cenerg y Epiroc.

b) Muestra

Aplicando la fórmula para el cálculo del tamaño de muestra significativa en una población finita, se obtuvo el siguiente valor:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot \sigma^2}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot \sigma^2}$$

Tabla 12

Cálculo de tamaño de muestra significativa

Parámetro	Valores
..Población (N)	1019
..Nivel de confianza	95%
..Nivel de significancia	5%
..Error (e)	5%
..Desviación estándar (σ)	0,5
..Z Alfa (Z)	1,96
..N° de Muestras (n)	279

Fuente: Elaboración propia

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

a) Técnicas

La recolección de datos se realizó por medio de una técnica documental, la cual consiste en recopilar la información necesaria a través de la basa de datos dispatch de la mina superficial y bajo parámetros definidos según criterio se realizó el análisis documental de dicha información obtenida anteriormente.

b) Instrumentos

Los instrumentos necesarios para recopilar los datos fueron el reporte de brocas consumidas del 2024, el cual fue obtenido del sistema dispatch de la mina superficial. Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos se usará el software SPSS, el cual nos ayudará realizar las pruebas necesarias para determinar el grado de relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas.

3.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

Se seguirá el siguiente orden para el procesamiento y análisis de datos:

a) Orden y limpieza de datos obtenidos del sistema dispatch

b) Prueba de normalidad o simetría (Kolmogórov-Smirnov / Shapiro-Wilk)

- Si $n > 50$, se realiza la prueba de Kolmogórov-Smirnov.
- Si $n \leq 50$, se realiza la prueba de Shapiro-Wilk.

Donde n es el número de datos para el análisis.

Luego de realizar el cálculo de muestra significativa, se obtuvo un valor de $n=279$.

Por lo tanto, se realizará la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov.

c) Análisis de correlación (Spearman o Pearson)

Luego de realizar la prueba de normalidad, según el valor de p calculado se elige la prueba de correlación a realizar:

- Si $p > 0.05$: No se rechaza la hipótesis nula. Esto nos indica que la variable tiene una distribución normal.
- Si $p < 0.05$: Se rechaza la hipótesis nula: Esto nos indica que la variable no tiene una distribución normal.

Según los valores de p obtenidos:

- Si ambas variables tienen una distribución normal se realiza la prueba de correlación de Pearson.
- Si una o ambas variables no tienen una distribución normal se realiza la prueba de correlación de Spearman.

d) Clasificación del coeficiente de correlación

Según el coeficiente de correlación obtenido, podemos clasificar la magnitud de la correlación existente entre nuestras dos variables de estudio.

e) Realización de pruebas de campo para comprobar la relación hallada

Del mismo modo, se realizará una comprobación en campo para la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación (TDC). Como más

adelante se indicará, para poder aumentar la velocidad de penetración de la broca necesitaremos encontrar cuales son los valores óptimos de pulldown y velocidad de rotación (RPM). Para encontrar los valores óptimos, se realizarán pruebas en campo donde se aumentará o reducirá 5 unidades al pulldown y RPM estándares, para poder identificar si encontrando el mejor valor se puede reducir la velocidad de penetración sin afectar el rendimiento de la cantidad de metros perforados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Descripción de las pruebas experimentales

Para poder corroborar la hipótesis planteada en el presente estudio, fue necesario realizar un análisis de correlación para poder calcular el grado de relación que existe entre ambas variables y a su vez evaluar su significancia de acuerdo al nivel de confianza adecuado, con el cual se acepta o rechaza nuestra hipótesis nula.

Hipótesis estadísticas para el grado de correlación y contraste de la hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No existe relación inversa entre la velocidad de penetración de la broca y el costo total de perforación.

$$H_0: r_{12} = 0$$

- Hipótesis alternativa (H_1): Existe relación inversa entre la velocidad de penetración de la broca y el costo total de perforación.

$$H_1: r_{12} > 0$$

Donde: r_{12} es la relación entre las variables de estudio 1 y 2.

V1: Velocidad de penetración de la broca (m/hr)

V2: Costo total de perforación obtenido (\$/m)

4.1.1. Selección de datos

En la Tabla 13, figuran las 279 muestras que fueron usadas para realizar las pruebas estadísticas. Cada una de las muestras tiene el mes cuando fueron descartadas y el equipo donde fueran descartadas, con sus respectivos valores de velocidad de penetración y costo total de perforación.

Tabla 13

Muestras usadas para las pruebas estadísticas

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
1	ENERO	DR21	26.450	13.959
2	ENERO	DR16	27.885	13.535
3	ENERO	DR18	36.431	10.566
4	ENERO	DR11	41.551	9.992
5	ENERO	DR09	23.917	15.242
6	ENERO	DR19	27.151	12.453
7	ENERO	DR19	21.794	15.055
8	ENERO	DR08	21.460	18.437
9	ENERO	DR05	22.827	22.234
10	ENERO	DR05	25.589	20.001
11	ENERO	DR18	35.632	11.483
12	ENERO	DR17	28.338	14.648
13	ENERO	DR12	40.388	8.779
14	ENERO	DR08	21.722	17.797
15	ENERO	DR05	22.804	23.368
16	ENERO	DR05	25.646	21.941
17	ENERO	DR11	36.452	10.395
18	ENERO	DR05	29.193	17.926
19	ENERO	DR18	42.681	9.836
20	ENERO	DR21	29.577	12.260
21	ENERO	DR21	36.247	10.059

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
22	ENERO	DR07	33.841	11.599
23	ENERO	DR07	26.880	13.042
24	ENERO	DR11	33.063	13.400
25	ENERO	DR16	22.188	14.944
26	ENERO	DR08	22.630	17.122
27	ENERO	DR08	25.899	14.791
28	ENERO	DR17	28.812	11.605
29	ENERO	DR05	23.408	21.544
30	ENERO	DR16	30.174	10.864
31	ENERO	DR05	29.358	18.629
32	FEBRERO	DR11	25.945	18.836
33	FEBRERO	DR19	22.222	19.823
34	FEBRERO	DR09	36.866	12.907
35	FEBRERO	DR08	23.946	17.240
36	FEBRERO	DR17	37.088	12.600
37	FEBRERO	DR12	24.344	17.644
38	FEBRERO	DR18	46.686	9.490
39	FEBRERO	DR05	25.141	10.720
40	FEBRERO	DR07	28.652	15.552
41	FEBRERO	DR16	20.678	22.599
42	FEBRERO	DR05	26.910	10.941
43	FEBRERO	DR18	46.678	8.898
44	FEBRERO	DR07	34.262	12.460
45	FEBRERO	DR04	22.288	13.158
46	FEBRERO	DR05	33.847	8.035
47	FEBRERO	DR12	25.159	16.814
48	FEBRERO	DR05	33.284	8.309
49	FEBRERO	DR17	30.397	16.232
50	FEBRERO	DR19	31.512	14.653
51	MARZO	DR19	26.825	18.945
52	MARZO	DR16	32.532	17.885
53	MARZO	DR11	42.881	12.624
54	MARZO	DR08	23.294	20.840
55	MARZO	DR05	22.306	19.504
56	MARZO	DR21	28.533	16.817
57	MARZO	DR18	49.602	11.437
58	MARZO	DR08	23.489	20.711
59	MARZO	DR16	28.462	18.231

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
60	MARZO	DR12	32.902	15.153
61	MARZO	DR21	31.896	17.073
62	MARZO	DR18	35.779	15.438
63	MARZO	DR16	28.101	16.544
64	MARZO	DR09	27.861	19.731
65	MARZO	DR04	21.061	20.537
66	MARZO	DR11	31.142	16.403
67	MARZO	DR18	44.498	11.097
68	MARZO	DR04	27.032	17.673
69	MARZO	DR17	34.301	15.031
70	MARZO	DR05	28.000	16.418
71	MARZO	DR12	42.191	11.608
72	MARZO	DR05	23.808	19.640
73	MARZO	DR16	30.960	16.378
74	ABRIL	DR04	20.497	20.853
75	ABRIL	DR18	36.438	10.520
76	ABRIL	DR18	41.242	9.199
77	ABRIL	DR08	24.349	14.171
78	ABRIL	DR21	29.898	12.679
79	ABRIL	DR21	24.847	15.455
80	ABRIL	DR09	35.114	10.162
81	ABRIL	DR05	48.238	8.969
82	ABRIL	DR19	23.166	15.746
83	ABRIL	DR18	40.703	9.819
84	ABRIL	DR19	23.885	13.644
85	ABRIL	DR19	27.851	12.076
86	ABRIL	DR08	28.572	12.151
87	ABRIL	DR12	31.533	10.893
88	ABRIL	DR05	19.041	22.714
89	ABRIL	DR07	36.468	10.402
90	ABRIL	DR07	33.865	11.233
91	ABRIL	DR17	30.333	10.713
92	ABRIL	DR05	23.728	18.386
93	ABRIL	DR11	23.372	15.602
94	ABRIL	DR04	21.688	19.448
95	ABRIL	DR09	43.205	8.653
96	ABRIL	DR18	40.387	10.032
97	ABRIL	DR12	37.138	10.479

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
98	ABRIL	DR18	32.575	12.478
99	ABRIL	DR07	19.520	17.447
100	ABRIL	DR16	25.207	12.620
101	MAYO	DR09	39.550	9.256
102	MAYO	DR08	29.187	12.318
103	MAYO	DR17	24.674	15.925
104	MAYO	DR12	26.902	15.264
105	MAYO	DR12	35.528	11.273
106	MAYO	DR09	40.182	8.891
107	MAYO	DR11	35.288	11.718
108	MAYO	DR17	35.672	11.543
109	MAYO	DR05	25.019	10.398
110	MAYO	DR17	35.271	12.925
111	MAYO	DR16	30.761	12.584
112	MAYO	DR12	30.890	12.606
113	MAYO	DR19	22.629	17.288
114	MAYO	DR19	22.682	18.105
115	MAYO	DR16	34.700	13.611
116	MAYO	DR05	24.261	11.579
117	MAYO	DR11	30.460	13.355
118	MAYO	DR11	23.366	17.573
119	MAYO	DR09	34.956	11.150
120	MAYO	DR09	37.931	10.342
121	MAYO	DR12	33.455	11.234
122	MAYO	DR09	29.668	13.617
123	MAYO	DR19	36.262	11.182
124	MAYO	DR11	31.612	13.450
125	MAYO	DR09	47.675	9.086
126	MAYO	DR19	28.418	15.044
127	MAYO	DR11	37.965	11.988
128	MAYO	DR12	29.410	11.971
129	MAYO	DR17	36.280	11.878
130	MAYO	DR18	31.110	12.044
131	MAYO	DR04	19.824	12.392
132	MAYO	DR09	31.712	13.743
133	JUNIO	DR05	26.842	12.622
134	JUNIO	DR12	38.992	11.879
135	JUNIO	DR05	28.800	12.247

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
136	JUNIO	DR08	28.172	14.057
137	JUNIO	DR07	44.704	9.176
138	JUNIO	DR11	33.434	16.929
139	JUNIO	DR09	37.227	11.306
140	JUNIO	DR12	37.357	10.928
141	JUNIO	DR07	31.236	13.910
142	JUNIO	DR08	28.322	14.359
143	JUNIO	DR12	42.898	9.118
144	JUNIO	DR04	21.725	14.559
145	JUNIO	DR12	27.220	16.129
146	JUNIO	DR11	26.126	21.525
147	JUNIO	DR09	33.147	12.449
148	JUNIO	DR16	20.395	25.993
149	JUNIO	DR19	31.950	17.238
150	JUNIO	DR04	23.404	14.247
151	JUNIO	DR08	25.391	16.292
152	JUNIO	DR05	27.935	11.935
153	JUNIO	DR19	36.987	15.536
154	JUNIO	DR16	25.523	23.193
155	JUNIO	DR18	28.012	15.583
156	JUNIO	DR04	21.840	15.212
157	JUNIO	DR12	44.327	9.547
158	JULIO	DR19	20.977	20.549
159	JULIO	DR11	23.888	19.278
160	JULIO	DR08	37.313	14.508
161	JULIO	DR09	41.292	14.126
162	JULIO	DR05	31.478	13.941
163	JULIO	DR18	28.051	20.779
164	JULIO	DR18	27.311	20.325
165	JULIO	DR16	25.236	17.196
166	JULIO	DR21	36.105	11.999
167	JULIO	DR07	56.518	9.614
168	JULIO	DR12	29.600	20.572
169	JULIO	DR18	27.777	19.610
170	JULIO	DR08	45.238	11.882
171	JULIO	DR09	42.946	12.835
172	JULIO	DR16	24.685	17.697
173	JULIO	DR16	23.649	20.445

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
174	JULIO	DR16	23.145	20.783
175	JULIO	DR12	41.282	13.326
176	JULIO	DR19	26.235	16.820
177	JULIO	DR08	46.067	13.255
178	AGOSTO	DR08	31.060	12.286
179	AGOSTO	DR21	40.757	11.818
180	AGOSTO	DR18	22.706	18.083
181	AGOSTO	DR09	27.292	14.224
182	AGOSTO	DR12	26.453	15.114
183	AGOSTO	DR12	30.503	12.542
184	AGOSTO	DR16	17.792	25.755
185	AGOSTO	DR16	31.934	14.330
186	AGOSTO	DR07	56.727	7.231
187	AGOSTO	DR21	42.370	11.246
188	AGOSTO	DR07	27.099	13.889
189	AGOSTO	DR09	29.575	13.121
190	AGOSTO	DR19	33.800	14.241
191	AGOSTO	DR11	26.634	17.286
192	AGOSTO	DR21	43.127	11.291
193	AGOSTO	DR11	28.946	15.762
194	SETIEMBRE	DR07	42.913	7.862
195	SETIEMBRE	DR21	34.085	16.402
196	SETIEMBRE	DR04	41.927	11.326
197	SETIEMBRE	DR17	25.622	21.496
198	SETIEMBRE	DR12	27.369	12.941
199	SETIEMBRE	DR21	38.845	13.400
200	SETIEMBRE	DR17	25.149	21.130
201	SETIEMBRE	DR04	40.001	11.059
202	SETIEMBRE	DR11	23.628	23.390
203	SETIEMBRE	DR18	29.404	12.309
204	SETIEMBRE	DR12	36.331	9.736
205	SETIEMBRE	DR11	30.323	17.491
206	SETIEMBRE	DR11	31.812	17.159
207	SETIEMBRE	DR17	28.987	17.958
208	SETIEMBRE	DR07	26.307	13.201
209	SETIEMBRE	DR16	20.369	24.898
210	SETIEMBRE	DR11	29.058	18.167
211	SETIEMBRE	DR04	34.333	15.288

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
212	SETIEMBRE	DR17	25.102	23.348
213	SETIEMBRE	DR08	22.188	15.265
214	SETIEMBRE	DR09	31.310	11.934
215	SETIEMBRE	DR18	32.761	11.234
216	SETIEMBRE	DR21	28.329	19.502
217	SETIEMBRE	DR09	35.776	10.598
218	SETIEMBRE	DR16	19.047	26.836
219	SETIEMBRE	DR04	47.197	9.608
220	SETIEMBRE	DR17	27.961	19.709
221	SETIEMBRE	DR19	21.680	23.744
222	OCTUBRE	DR12	40.453	8.037
223	OCTUBRE	DR05	44.946	8.833
224	OCTUBRE	DR05	34.035	10.091
225	OCTUBRE	DR04	33.900	11.779
226	OCTUBRE	DR16	22.205	24.417
227	OCTUBRE	DR21	27.985	21.406
228	OCTUBRE	DR18	35.853	9.965
229	OCTUBRE	DR04	42.634	9.224
230	OCTUBRE	DR18	45.500	7.557
231	OCTUBRE	DR17	34.790	18.026
232	OCTUBRE	DR17	30.064	18.260
233	OCTUBRE	DR12	27.874	11.558
234	OCTUBRE	DR05	41.165	9.154
235	OCTUBRE	DR19	21.967	27.108
236	OCTUBRE	DR07	22.549	13.820
237	OCTUBRE	DR11	27.861	20.118
238	OCTUBRE	DR21	28.039	19.999
239	OCTUBRE	DR21	35.481	16.971
240	OCTUBRE	DR17	31.474	18.218
241	OCTUBRE	DR21	25.131	23.199
242	OCTUBRE	DR08	21.819	16.511
243	OCTUBRE	DR17	30.064	18.178
244	OCTUBRE	DR04	28.090	12.691
245	OCTUBRE	DR08	19.834	15.732
246	OCTUBRE	DR09	33.625	10.025
247	OCTUBRE	DR09	31.572	10.579
248	OCTUBRE	DR21	27.408	22.671
249	OCTUBRE	DR12	35.932	8.882

N°	MES	EQUIPO	VP (m/hr)	TDC (US\$/m)
250	OCTUBRE	DR19	22.488	25.479
251	OCTUBRE	DR04	29.553	10.923
252	OCTUBRE	DR16	21.820	25.061
253	OCTUBRE	DR21	26.678	22.467
254	OCTUBRE	DR08	21.534	15.555
255	OCTUBRE	DR11	31.678	17.717
256	OCTUBRE	DR05	51.662	7.087
257	NOVIEMBRE	DR12	35.852	8.602
258	NOVIEMBRE	DR11	29.509	20.242
259	NOVIEMBRE	DR18	36.193	9.192
260	NOVIEMBRE	DR18	33.357	9.207
261	NOVIEMBRE	DR05	27.477	10.637
262	NOVIEMBRE	DR18	38.767	8.553
263	NOVIEMBRE	DR21	31.020	19.887
264	NOVIEMBRE	DR04	31.901	8.246
265	NOVIEMBRE	DR21	48.377	15.156
266	NOVIEMBRE	DR04	30.217	8.689
267	NOVIEMBRE	DR05	35.294	7.666
268	NOVIEMBRE	DR07	26.996	11.717
269	NOVIEMBRE	DR08	25.445	11.567
270	NOVIEMBRE	DR08	21.612	14.255
271	NOVIEMBRE	DR17	33.601	16.992
272	NOVIEMBRE	DR08	20.594	14.966
273	NOVIEMBRE	DR17	24.434	23.358
274	NOVIEMBRE	DR05	38.792	6.860
275	NOVIEMBRE	DR08	20.843	14.319
276	NOVIEMBRE	DR04	28.024	10.146
277	NOVIEMBRE	DR12	36.176	8.645
278	NOVIEMBRE	DR05	28.991	9.247
279	NOVIEMBRE	DR16	32.417	18.551

Fuente: Elaboración propia

Las 279 muestras fueron seleccionadas de la siguiente manera:

- Se tenía una población total de 1019 muestras, las cuales eran la cantidad total de muestras descartadas en el año 2024 de las marcas Telerion, Ryder y Epiroc en 11 y 12 ¼ pulgadas.
- Usando la fórmula para calcular la muestra representativa se calculó que 279 muestras del total debían ser usadas para el tratamiento estadístico.
- Al total de muestras se le aplicó un procedimiento de limpieza de datos, el cual consistió en eliminar las brocas que habían sido descartadas por fallas de fábrica o fallas operativas. También se descartó las brocas que no tenían todas completas todas sus características de uso, por ejemplo: costo horario máquina, costo de broca, etc.
- Cuando se culminó con la limpieza de los datos, nos quedamos con 938 muestras, a las cuales se les aplicó la fórmula aleatoria () para obtener un valor aleatorio entre 0 y 1. Ordenando estos valores obtenidos con la fórmula anteriormente mencionada, nos quedamos con los 279 valores más bajos.

4.1.2. Prueba de normalidad o simetría

Antes de proceder con la prueba de correlación, fue necesario evaluar la normalidad o simetría de cada variable para elegir el método de análisis de correlación que usaremos. Se importaron las 279 filas de datos al software SPSS Statistics, donde se realizó la prueba de estadística para estimar el grado de normalidad de las variables según

su análisis de significancia, el tipo de prueba fue seleccionada según la cantidad de datos que se tienen:

- Si $n > 50$, se realiza la prueba de Kolmogórov – Smirnov.
- Si $n \leq 50$, se realiza la prueba de Shapiro – Wilk.

Donde n es el número de muestra.

Para la prueba de normalidad se planteó una hipótesis de normalidad para las variables, las cuales se someterán a un análisis de significancia en base a los resultados de su significancia bilateral o p-valor.

- Hipótesis nula (H_0): Los datos tienen una distribución normal.
- Hipótesis nula (H_1): Los datos no tienen una distribución normal.

Tanto la prueba de normalidad como la de correlación se realizaron con un nivel de confianza del 95 %, lo que implica un margen de error o significancia del 5 % (0,05) para un análisis bilateral, siendo este uno de los enfoques más utilizados en pruebas estadísticas.

Posteriormente se realizó el análisis de significancia del p-valor o sig. bilateral, donde:

- Si $p\text{-valor} < \alpha$, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1
- Si $p\text{-valor} \geq \alpha$, se acepta la H_0

Tabla 14

Muestras usadas para las pruebas estadísticas

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VP	.082	279	<.001	.958	279	<.001
TDC	.093	279	<.001	.962	279	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaborado en SPSS Statistics

Dado que el nivel de significancia es $\alpha=0.05$, entonces como apreciamos en la Tabla 15, según la prueba de Kolmogorov-Smirnov, para la V1 el p-valor es de <0.001 y para la V2 es <0.001 .

Para V1 (velocidad de penetración):

$$p < 0.001$$

- Como el valor es menor a 0.05 se acepta H_1 . Esto nos indica que la variable no tiene una distribución normal tal y como se aprecia en la Figura 21.

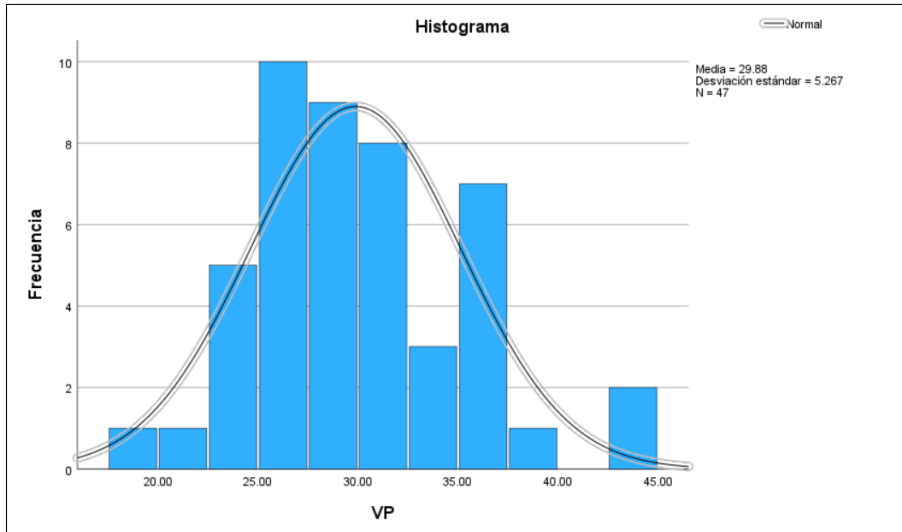
Para V2 (costo total de perforación):

$$p < 0.001$$

- Como el valor es menor a 0.05 se acepta H_1 . Esto nos indica que la variable no tiene una distribución normal tal y como se aprecia en la Figura 22.

Figura 20

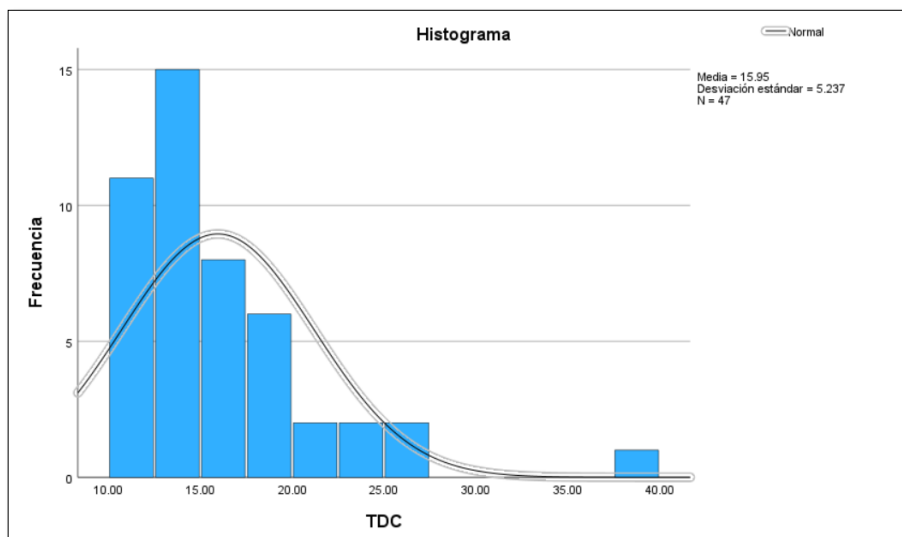
Gráfico de normalidad de la variable velocidad de penetración



Fuente: Elaborado en SPSS Statistics

Figura 21

Gráfico de normalidad de la variable costo total de perforación



Fuente: Elaborado en SPSS Statistics

Se concluyó que V1 y V2 no tienen una distribución normal, por lo que se usará un análisis de correlación no paramétrico de Rho de Spearman.

4.1.3. Análisis de correlación

Una vez definidas nuestras variables de estudio, V1 (velocidad de penetración) y V2 (costo total de perforación) no poseen una distribución normal, por lo que se procedió a realizar la prueba de correlación de Spearman.

Para el tratamiento, teniendo los datos importados en el SPSS realizamos un análisis bivariado, obteniendo como resultado un coeficiente de Spearman, con una significancia bilateral o p-valor que se pondrá a prueba con un nivel de confianza de 95%, permitiendo una significancia o nivel de error de 0.05, el cual servirá para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

Adicionalmente, fue realizado el diagrama de dispersión que permite visualizar gráficamente el grado y tipo de correlación estimado entre las variables analizadas (Figura 23).

Los resultados obtenidos del análisis estadístico del software SPSS Statistics detallados en la Tabla 16, determinaron un coeficiente de correlación Rho de Spearman de -0,700, asimismo el p-valor es menor a 0.001 para los 279 datos analizados.

Tabla 15

Resultados de la correlación entre la VP y el TDC

		Correlaciones		
			VP	TDC
Rho de Spearman	VP	Coefficiente de correlación	1.000	-.700**
		Sig. (bilateral)	.	<.001
		N	279	279
	TDC	Coefficiente de correlación	-.700**	1.000
		Sig. (bilateral)	<.001	.
		N	279	279

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Elaborado en SPSS Statistics

Para la prueba estadística de correlación se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No existe relación inversa entre la velocidad de penetración de la broca y el costo total de perforación
- Hipótesis alternativa (H_1): Existe una relación inversa entre la velocidad de penetración de la broca y el costo total de perforación.

$$H_0: r_{12} = 0$$

$$H_1: r_{12} < 0$$

Donde r_{12} es la relación entre las variables de estudio 1 y 2.

V1: Velocidad de penetración de la broca (m/hr)

V2: Costo total de perforación obtenido (\$/m)

Establecemos un nivel de confianza de 95% y una significancia de 0.05. Se realizó el análisis de significancia p-valor o sig. bilateral, donde:

- Si $p\text{-valor} < \alpha$, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1
- Si $p\text{-valor} \geq \alpha$, se acepta la H_0

En base a un nivel de significancia de 0.05 y un p-valor de -0.70 se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 estableciendo una relación inversa entre ambas variables.

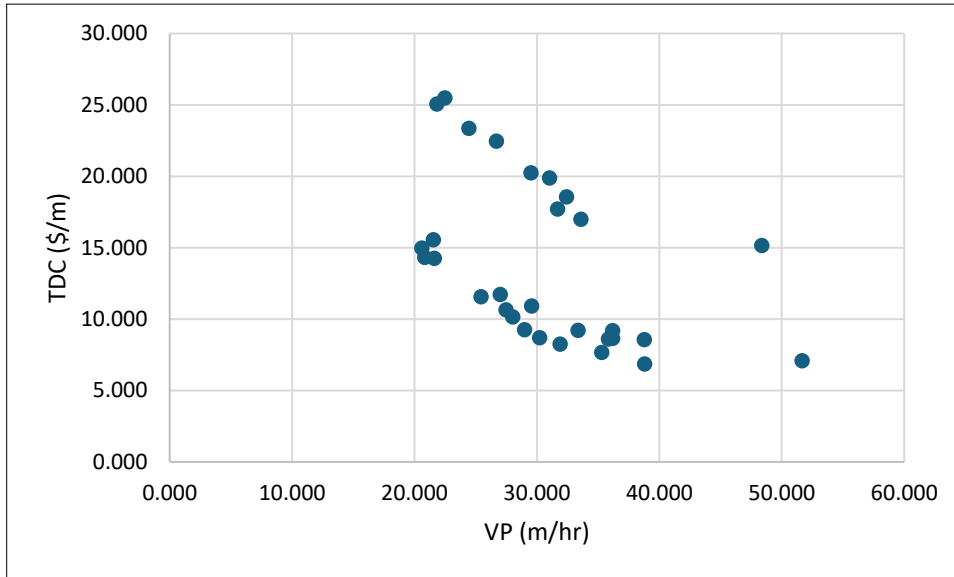
4.2. Presentación y análisis de los resultados

Se interpretan los resultados obtenidos en la prueba de correlación de Spearman para la velocidad de penetración y el costo total de perforación, donde se encuentra una correlación inversa de coeficiente Rho de Spearman de -0.70 siendo de magnitud alta, tal y como se indica en la Tabla 16, lo que permite evaluar y aceptar nuestra hipótesis alternativa propuesta que señala la existencia de una asociación entre ambas variables de estudio con un nivel de confianza de 95%, margen de error de 0.05 y gran consistencia gráfica como se evidencia en la Figura 22.

Con el grado de correlación encontrado se confirma la hipótesis del presente estudio, donde se indicaba que existía un tipo de correlación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación.

Figura 22

Gráfico de dispersión entre la VP y el TDC



Fuente: Elaborado en SPSS Statistics

Sin embargo, para poder elevar la velocidad de penetración debemos tener en cuenta que esta variable es el resultado de dividir la cantidad total de metros perforados de la broca y el total de horas que ha sido usada. Entonces, para elevar la velocidad de penetración necesitamos perforar mayor cantidad de metros en menos horas de trabajo, para realizar esto debemos tener en cuenta los parámetros geológicos y geotécnicos del terreno para poder encontrar los correctos parámetros de perforación según el tipo de roca que se esté perforando, para poder aprovechar al máximo la capacidad de la broca sin dañarla por una mala práctica operativa.

4.3. Contrastación de hipótesis

En la Tabla 17, se presentan los resultados de la hipótesis planteada para el análisis estadístico inferencial previamente realizado, necesario para validar la hipótesis general del presente estudio, asimismo se evaluó la magnitud de la correlación obtenida en base a una escala establecida por Gamarra y otros (2015), que se muestra en la figura 23.

Figura 23

Escala de magnitud de correlación en base al coeficiente de Spearman o Pearson

Rangos	Magnitud
0.81 a 1.00	Muy alta
0.61 a 0.80	Alta
0.41 a 0.60	Moderada
0.21 a 0.40	Moderada
0.01 a 0.20	Muy baja

Fuente: Estadística y aplicaciones en SPSS de Gamarra y otros (2015)

Tabla 16

Resultados del análisis estadístico para la prueba de hipótesis

Hipótesis aceptada	Nivel de confianza	Nivel de significancia	Coefficiente de correlación Rho	Tipo	Magnitud
Existe relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación	95%	0.05	-0.7	Inversa y directa	Alta

Fuente: Elaboración propia

Dado que la prueba de correlación arrojó resultados satisfactorios respecto a la validación de nuestra hipótesis general, podemos concluir que de forma general que la velocidad de penetración de la broca tricónica tiene una relación inversa con el costo total de perforación por metro. En otras palabras, si se aumenta la velocidad de penetración se reducirá el TDC por metro.

Cabe resaltar que el presente estudio realizado es netamente estadístico, se debe realizar un estudio de campo para evaluar cuales son los máximos parámetros de perforación que se pueden usar por tipo de terreno.

4.4. Realización de pruebas de campo

Una vez encontrada la existencia de una relación alta entre ambas variables, se procederá a realizar pruebas de campo en terreno duro y medio de fase 5 y fase 6 respectivamente. Los objetivos de estas pruebas de campo serán encontrar los valores óptimos de pulldown y RPM para la broca tricónica, donde podemos obtener menor TDC del que usualmente tenemos sin afectar el rendimiento ni vida útil de nuestras brocas. Dicha prueba de campo será realizada con brocas de 11”.

4.4.1. Velocidad de rotación (RPM) en terreno DURO

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #18 (CAT MD6640) ubicada en la fase 5 del tajo con presencia de dacita porfirítica para poder realizar los cálculos de RPM en el mes de marzo del año 2024. Para llevar a cabo las mediciones, se usará un valor estándar no variable para el pulldown (85klbs), debido a que este suele ser el parámetro estándar para perforar en terreno duro, pero también será determinado más adelante el pulldown óptimo.

En la tabla 17 y en la figura 24, podremos apreciar los resultados de 5 brocas descartadas en fase 5 en el nivel 2770:

Tabla 17

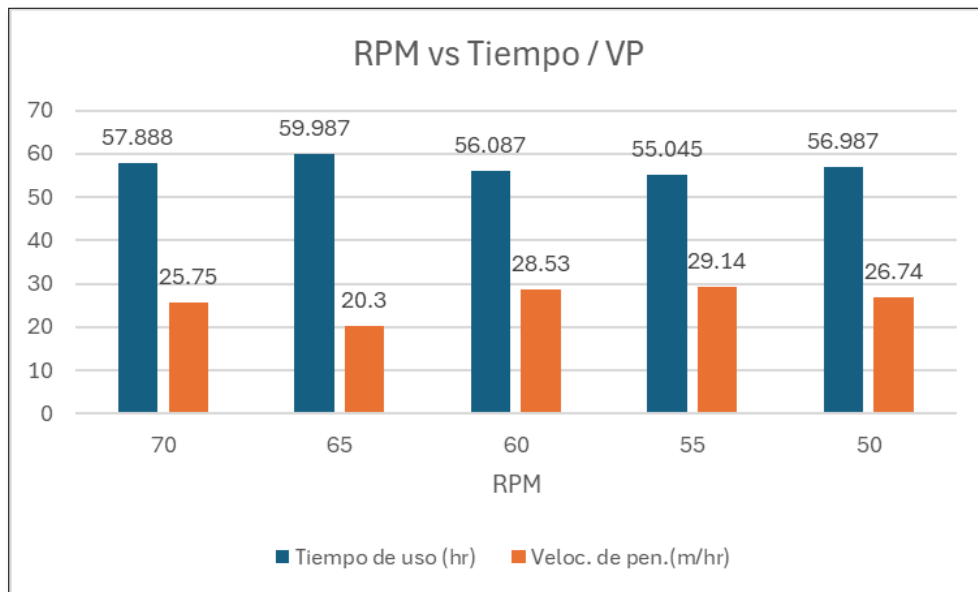
Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno duro

Proyecto	Terreno	Tipo de roca	RPM	Pulldown	Metros totales perforados	Tiempo de uso (hr)	Veloc. de pen.(m/hr)
2770048	Duro	Dp	70	85	1490.616	57.888	25.75
2770048	Duro	Dp	65	85	1217.736	59.987	20.30
2770048	Duro	Dp	60	85	1600.162	56.087	28.53
2770049	Duro	Dp	55	85	1604.011	55.045	29.14
2770049	Duro	Dp	50	85	1523.832	56.987	26.74

Fuente: Elaboración propia

Figura 24

RPM óptimo en terreno duro



Fuente: Elaboración propia

En la figura 24, se muestra la relación entre el tiempo de uso (hr) y la velocidad de penetración (m/hr) cuando se usa 80, 75, 70, 65 y 60 de RPM respectivamente. De acuerdo con el análisis realizado en el terreno duro, se recomienda usar 55 de RPM donde se alcanzó una velocidad de penetración de 29.14 (m/hr).

4.4.2. Velocidad de rotación (RPM) en terreno MEDIO

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #17 (P&H 320XPC) ubicada en la fase 6 del tajo con presencia de diorita para poder realizar los cálculos de RPM en el mes de marzo del año 2024. Para llevar a cabo las mediciones, se usará un valor estándar no variable para el pulldown (75klbs), debido a que este suele ser el parámetro estándar para perforar en terreno medio, pero también será determinado más adelante el pulldown óptimo.

En la tabla 18 y en la figura 25, podremos apreciar los resultados de 5 brocas descartadas en fase 6 en el nivel 3145:

Tabla 18

Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno medio

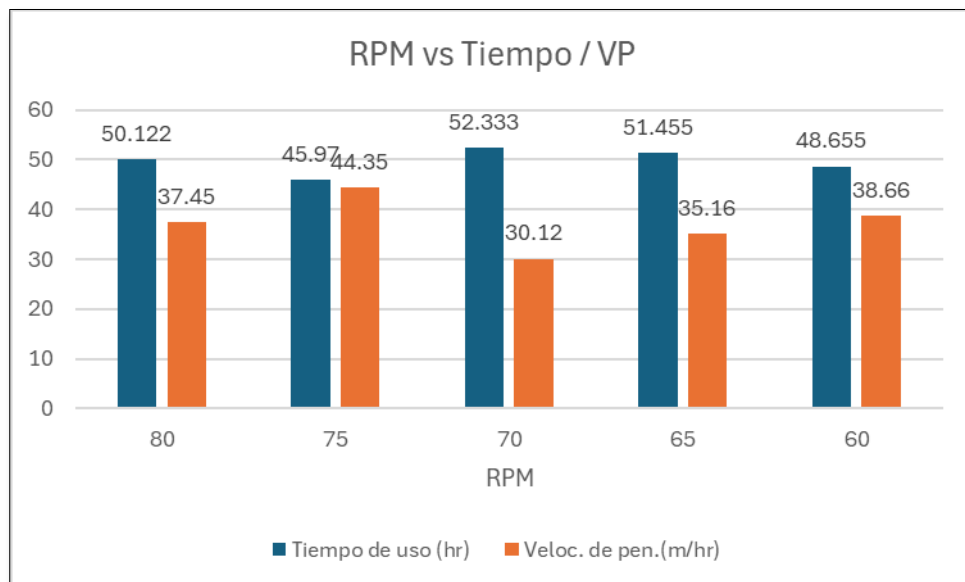
Proyecto	Terreno	Tipo de roca	RPM	Pulldown	Metros totales perforados	Tiempo de uso (hr)	Veloc. de pen.(m/hr)
3145077	Medio	Di-prop	80	75	1877.069	50.122	37.45
3145077	Medio	Di-prop	75	75	2038.789	45.970	44.35

3145077	Medio	Di-prop	70	75	1576.269	52.333	30.12
3145078	Medio	Di-prop	65	75	1809.158	51.455	35.16
3145078	Medio	Di-prop	60	75	1881.002	48.655	38.66

Fuente: Elaboración propia

Figura 25

RPM óptimo en terreno medio



Fuente: Elaboración propia

En la figura 25, se muestra la relación entre el tiempo de uso (hr) y la velocidad de penetración (m/hr) cuando se usa 80, 75, 70, 65 y 60 de RPM respectivamente. De acuerdo con el análisis realizado en el terreno medio, se recomienda usar 75 de RPM donde se alcanzó una velocidad de penetración de 44.35 (m/hr).

4.4.3. Pulldown en terreno DURO

Una vez que hemos determinado que 55 RPM son las revoluciones por minuto óptimas para el terreno duro, procedemos a usarla como un valor estándar para las pruebas de Pulldown.

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #18 (CAT MD6640) ubicada en la fase 5 del tajo con presencia de dacita porfírica para poder realizar los cálculos de pulldown en el mes de marzo del año 2024.

En la tabla 19 y en la figura 26, podremos apreciar los resultados de 5 brocas descartadas en fase 5 en el nivel 2770:

Tabla 19

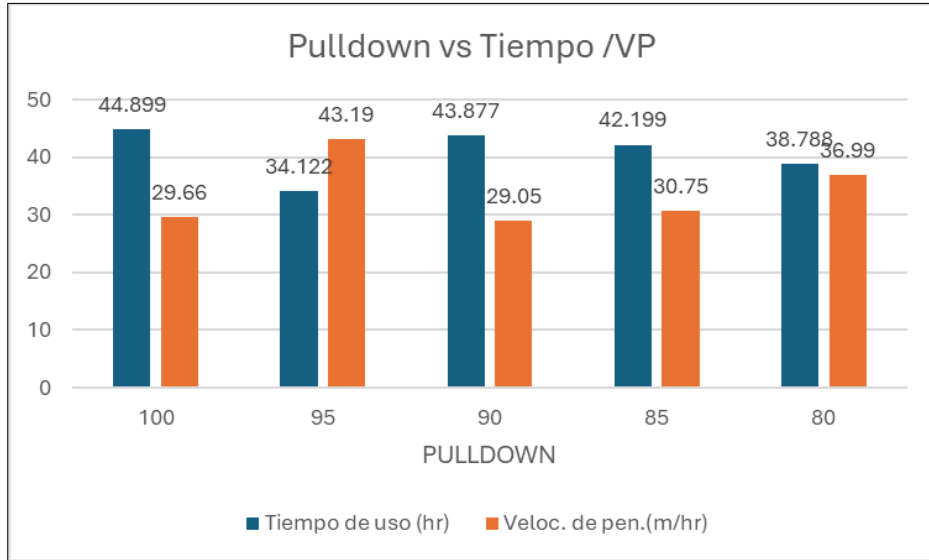
Resultados generales para las pruebas de pulldown en terreno duro

Proyecto	Terreno	Tipo de roca	RPM	Pulldown	Metros totales perforados	Tiempo de uso (hr)	Veloc. de pen.(m/hr)
2770048	Duro	Dp	55	100	1331.704	44.899	29.66
2770048	Duro	Dp	55	95	1473.729	34.122	43.19
2770048	Duro	Dp	55	90	1274.627	43.877	29.05
2770049	Duro	Dp	55	85	1297.619	42.199	30.75
2770049	Duro	Dp	55	80	1434.768	38.788	36.99

Fuente: Elaboración propia

Figura 26

Pulldown óptimo en terreno duro



Fuente: Elaboración propia

En la figura 26, se muestra la relación entre el tiempo de uso (hr) y la velocidad de penetración (m/hr) cuando se usa 100, 95, 90, 85 y 80 de pulldown respectivamente. De acuerdo con el análisis realizado en el terreno duro, se recomienda usar 95 de RPM donde se alcanzó una velocidad de penetración de 43.19 (m/hr).

4.4.4. Pulldown en terreno MEDIO

Una vez que hemos determinado que 75 RPM son las revoluciones por minuto óptimas para el terreno medio, procedemos a usarla como un valor estándar para las pruebas de Pulldown.

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #17 (P&H 320XPC) ubicada en la fase 6 del tajo con presencia de diorita para poder realizar los cálculos de pulldown en el mes de marzo del año 2024.

En la tabla 20 y en la figura 27, podremos apreciar los resultados de 5 brocas descartadas en fase 6 en el nivel 3145:

Tabla 20

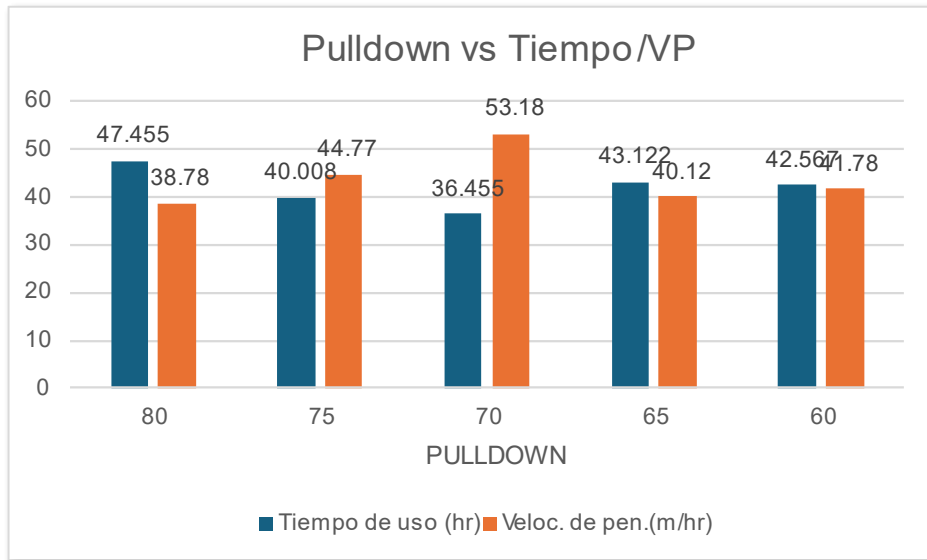
Resultados generales para las pruebas de RPM en terreno medio

Proyecto	Terreno	Tipo de roca	RPM	Pulldown	Metros totales perforados	Tiempo de uso (hr)	Veloc. de pen.(m/hr)
3145077	Medio	Di-prop	75	80	1840.305	47.455	38.78
3145077	Medio	Di-prop	75	75	1791.158	40.008	44.77
3145077	Medio	Di-prop	75	70	1938.677	36.455	53.18
3145078	Medio	Di-prop	75	65	1730.054	43.122	40.12
3145078	Medio	Di-prop	75	60	1778.449	42.567	41.78

Fuente: Elaboración propia

Figura 27

Pulldown óptimo en terreno medio



Fuente: Elaboración propia

En la figura 27, se muestra la relación entre el tiempo de uso (hr) y la velocidad de penetración (m/hr) cuando se usa 80, 75, 70, 65 y 60 de pulldown respectivamente. De acuerdo con el análisis realizado en el terreno medio, se recomienda usar 70 de pulldown donde se alcanzó una velocidad de penetración de 53.18 (m/hr).

4.5. Análisis de costos totales de perforación

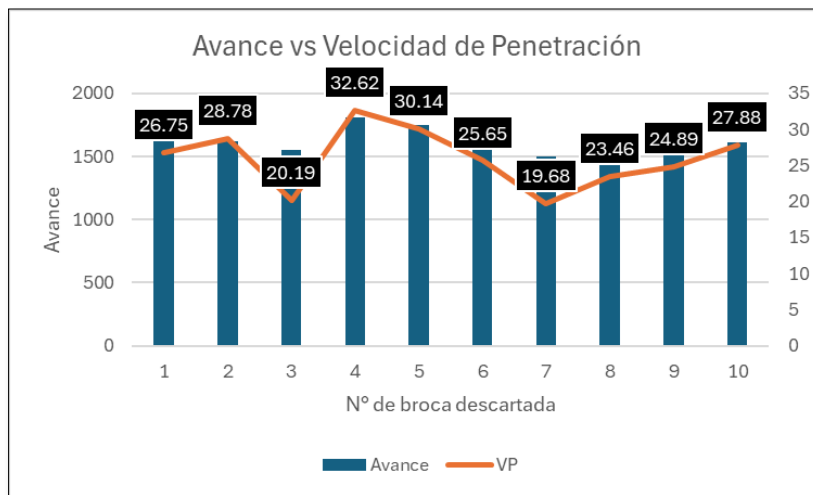
4.5.1. Terreno duro

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #18 (CAT MD6640) ubicada en la fase 5 del tajo, donde se usaron los antiguos y los nuevos parámetros de perforación para analizar los resultados obtenidos.

Se recopiló los datos de 10 brocas descartadas en el mes de marzo del año 2024, en la figura 28 se muestran las velocidades de penetración de las brocas, destacando la que uso los parámetros de perforación óptimos que fueron calculados anteriormente con una velocidad de penetración de 32.62 m/hr.

Figura 28

Avance de la broca vs Velocidad de Penetración en terreno duro



Fuente: Elaboración propia

Tabla 21

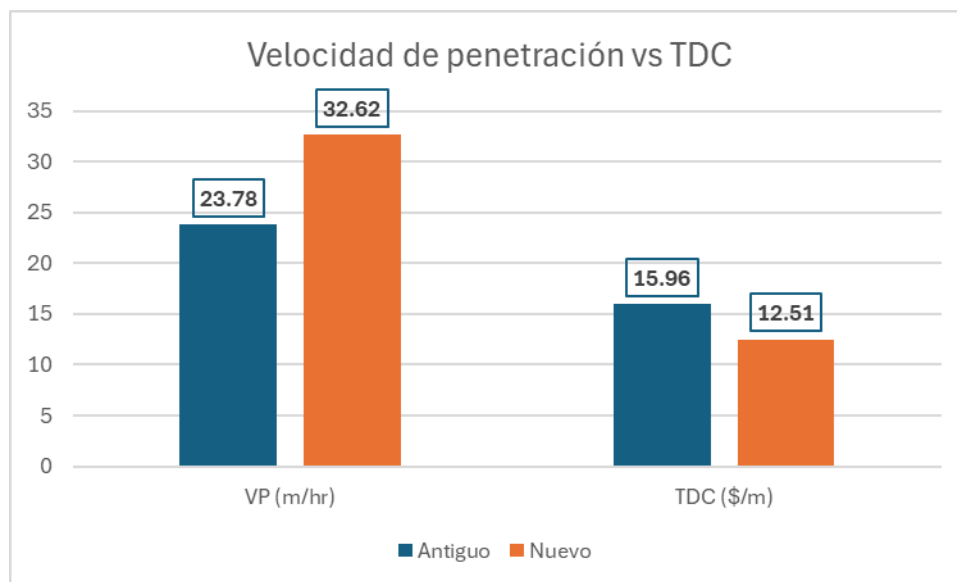
Costos de perforación del mes de marzo para terreno duro

N°	VP (m/hr)	TDC (\$/m)
1	26.75	18.56
2	28.78	15.16
3	20.19	21.46
4	32.62	12.51
5	30.14	14.11
6	25.65	17.62
7	19.68	23.66
8	23.46	20.13
9	24.89	18.45
10	27.88	18.23

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Resultados con parámetros de perforación antiguos y nuevos



Fuente: Elaboración propia

Según el reporte oficial del mes de marzo, en la perforadora #18 se perforaron 12 420 metros, considerando un TDC promedio mensual de 17.98 \$/m lo cual equivale a \$223 311.6; contra los \$159 100.2 que sería el costo si aplicamos los nuevos parámetros de perforación que se obtuvieron en el estudio, obteniendo finalmente un ahorro mensual de \$64211.4 en solo una perforadora primaria que opera en terreno duro, lo que supone un ahorro del 30% respecto al monto anterior.

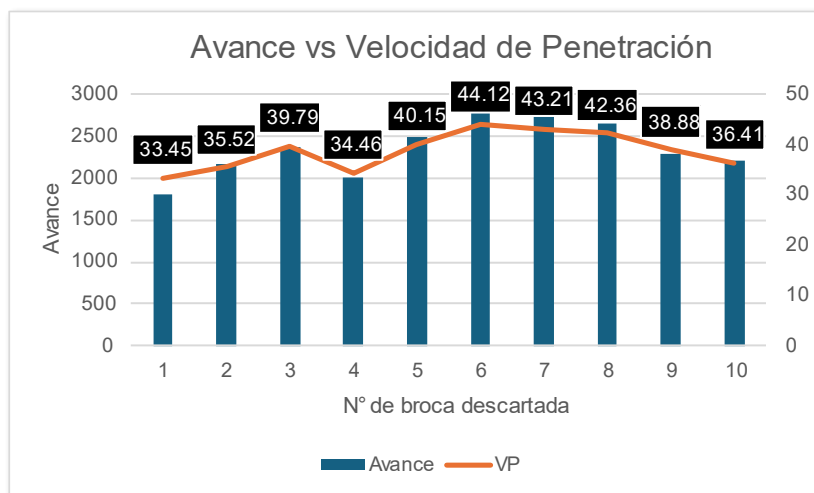
4.5.2. Terreno medio

Este análisis fue realizado con los datos tomados de la perforadora #17 (P&H 320XPC) ubicada en la fase 6 del tajo, donde se usaron los antiguos y los nuevos parámetros de perforación para analizar los resultados obtenidos.

Se recopiló los datos de 10 brocas descartadas en el mes de marzo del año 2024, en la figura 30 se muestran las velocidades de penetración de las brocas, destacando la que uso los parámetros de perforación óptimos que fueron calculados anteriormente con una velocidad de penetración de 44.12 m/hr.

Figura 30

Avance de la broca vs Velocidad de Penetración en terreno medio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

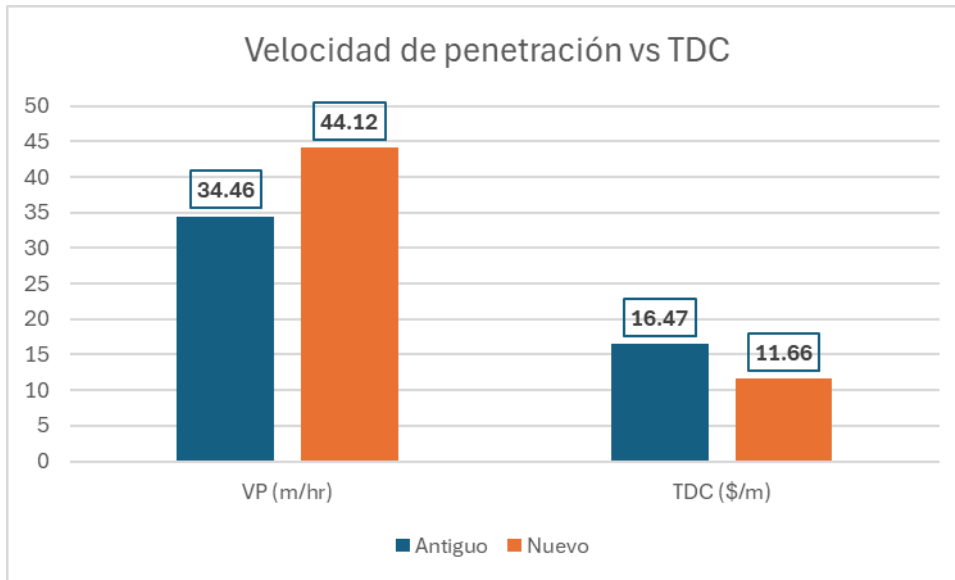
Costos de perforación del mes de marzo para terreno medio

N°	VP (m/hr)	TDC (\$/m)
1	33.45	20.79
2	35.52	18.45
3	39.79	16.56
4	34.46	20.33
5	40.15	13.66
6	44.12	11.66
7	43.21	12.87
8	42.36	12.54
9	38.88	18.83
10	36.41	19.02

Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Resultados con parámetros de perforación antiguos y nuevos



Fuente: Elaboración propia

Según el reporte oficial del mes de marzo, en la perforadora #17 se perforaron 13 656 metros, considerando un TDC promedio mensual de 16.47 \$/m lo cual equivale a \$224914.3; contra los \$159 228.9 que sería el costo si aplicamos los nuevos parámetros de perforación que se obtuvieron en el estudio, obteniendo finalmente un ahorro mensual de \$65685.4 en solo una perforadora primaria que opera en terreno medio, lo que supone un ahorro del 30% respecto al monto anterior.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Aplicación de la tecnología encontrada

El presente trabajo permite analizar la relación inversa que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación, así como identificar los factores principales para poder aumentar el rendimiento de las brocas tricónicas con el menor TDC posible.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, aumentar la cantidad de metros perforados con un menor costo por metro es importante para:

- Los proyectos de perforación asignados a cada equipo se terminarán en menor tiempo, garantizándose un mayor avance por hora sin necesidad de tener costos elevados.
- Usar correctos parámetros de perforación, lo que significa que aprovecharemos el máximo rendimiento de las brocas tricónicas y de todos los aceros de perforación que componen la columna.
- Si se realiza la prueba de campo con la relación aplicada, se podrá elegir de forma más precisa la broca adecuada según el tipo de roca que se presente en la zona de perforación, lo que evitaría el desgaste prematuro de las brocas por una mala

selección del producto. El análisis estadístico que se ha realizado sirve como base para futuras investigaciones.

- Realizar capacitaciones a los perforistas usando la información obtenida acerca de la relación existente entre las dos variables, con el objetivo de tener mejores prácticas operativas.
- Reducir la cantidad de brocas tricónicas consumidas, lo que influye directamente en una reducción significativa del presupuesto anual de perforación.

5.2. Contraste con trabajos de investigación similares

Tabla 23

Resultados homólogos de autores

Estudio	Objetivos del estudio	Resultados principales
Marroquín (2022)	Incrementar la velocidad de penetración para la reducción de los costos totales de perforación en el Asentamiento Minero Toquepala.	La optimización del costo total de perforación va a depender de varios factores como el conjunto de aceros de perforación y el uso de correctos parámetros de perforación según el tipo de terreno.
Alaya (2022)	Evaluar la optimización del Costo Total de Perforación (T.D.C) al incrementar la velocidad de penetración en la perforación primaria en Minera Yanacocha.	Teniendo buena capacidad de compresores, buenos sistemas hidráulicos de pulldown y presión de rotación, buenos accesorios de perforación y un buen entrenamiento de los operadores podremos incrementar la velocidad de penetración y reducir el costo total de perforación.

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Mediante el análisis estadístico realizado se comprobó que existe una relación inversamente proporcional entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación por metro. Con un nivel de confianza del 95% se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.7, lo que indica una relación alta e inversa entre ambas variables. Del mismo modo, mediante el análisis realizado en campo se comprobó que para reducir el TDC debemos primero aumentar la velocidad de penetración, lo cual fue corroborado seleccionando parámetros óptimos de pulldown y RPM por tipo de terreno para poder aprovechar el rendimiento de la broca.

En la velocidad de penetración influye el uso de correctos parámetros de pulldown y RPM, los cuales deben ir de acuerdo al tipo de terreno que se vaya a perforar. Se deben usar parámetros que no excedan los valores recomendados para no dañar la broca y valores que no estén por debajo de los recomendados para poder aprovechar al máximo la capacidad operativa de la broca tricónica, es decir, perforar la misma cantidad de metros, pero en menos tiempo. En el costo total de perforación (TDC) influye la velocidad de penetración, tal y como se comprobó anteriormente. También intervienen factores como el precio de la broca, costos horarios de la perforadora (mano de obra, costo de operación, costo de mantenimiento y depreciación por año del equipo) y cantidad de metros perforados. El objetivo de reducir el TDC es optimizar el precio por metro sin descuidar la productividad de taladros.

Tal y como se comprobó en el estudio de campo, no podemos usar los mismos parámetros de perforación para todos los tipos de terreno. Seguiremos la premisa de que si el terreno es duro tendremos que aumentar el pulldown y reducir RPM y si el terreno es medio o no tan competente reducir el pulldown y aumentar RPM. Debemos evaluar el tipo de terreno que estemos perforando para realizar un rápido análisis y determinar los parámetros de perforación óptimos para poder reducir el TDC.

En el presente estudio se comprobó que determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación generará un impacto económico positivo en la empresa, reduciendo en 30% los costos totales. Del mismo modo, al aprovechar el máximo rendimiento de nuestras brocas tricónicas podremos aumentar su vida útil, disminuir el consumo de brocas y reducir los tiempos muertos que tiene la perforación primaria.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que las empresas proveedoras de brocas capaciten a los operadores de perforadores, con el fin de que conozcan los parámetros de perforación adecuados. Estos, combinados con los conocimientos empíricos de cada uno de los perforistas, contribuirán a un mejor cuidado y uso de las brocas tricónicas

Usando como base la relación inversamente proporcional entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación se deberían realizar futuros trabajos de campo, para poder identificar el rendimiento de las brocas tricónicas según el tipo de terreno y elaborar un estándar de parámetros de perforación para aprovechar al máximo la capacidad operativa de las brocas tricónicas.

Realizar un monitoreo en tiempo real del proceso de perforación primaria, para identificar las posibles causas de desgaste de las brocas tricónicas y posteriormente elaborar un plan de acción para reducir las muertes prematuras y el aumento del consumo de brocas tricónicas, con el objetivo de ahorrar dinero y sacar el máximo provecho de los recursos de la empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Marroquín, N. (2022). *Reducción del costo total de perforación incrementando la velocidad de penetración en el Asentamiento Minero de Toquepala – Tacna*. Obtenido de Repositorio Concytec: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNMS_ae9f08e72a798e31e8f9f619e7e7af7c/Details.
- Chambe, P. (2024). *Optimización del performance de brocas tricónicas por medio de un análisis comparativo de brocas terelion vs cenerg en la Unidad Minera Toquepala*. Obtenido de Reposito UNJBG: <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/3b945228-4f1c-4d61-8e5f-6cd83f74af1f>.
- Montoya, F. (2019). *Optimización de procesos en la perforación mediante un estudio comparativo de brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala - Southern Peru Cooper Corporation 2018*. Obtenido de Reposito UCSM: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/d839a4f9-72bd-4694-a50b-4ebe8a06d55d>.
- Alaya, L. (2018). *Influencia de la velocidad de penetración en el proceso de perforación primaria en Minera Yanacocha, Cajamarca, 2018*. Obtenido de Repositorio UAP: <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/2779>.

- Castro, R. (2019). *Aplicación de la fórmula de R. Praillet para evaluar la velocidad de penetración y su impacto en la perforación primaria en una mina a tajo abierto de Ica - Perú 2018*. Obtenido de repositorio UCSM:
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/c55eeb6e-f9d3-47d5-8146-37e3a75683b5>.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Obtenido de UPM: <https://oa.upm.es/>.
- Altamirano, H. & Santamaria, O. (2019). *Optimización del costo de perforación para aceros DTH en la mina modelo a tajo abierto, Huamachuco, 2018*. Obtenido de Concytec: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_e2c8298d00241b68c630fdc5894a479e/Details.
- Área de Formación y Capacitación. *Introducción a la perforación*. Obtenido de AGECOMET S.A.: http://www.agecomet.clc1/cont_mod1.pdf
- Jimeno, C. L. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.
- Polanco, E. (2016). *Mejoras de la gestión de perforación Mina Chuquicamata*. Obtenido de Repositorio UCHILE: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/140580/Mejoras-de-la-gestion-de-perforacion-MinaChuquicamata.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Huisacayna et al. (2013). *Trabajo de investigación: Southern Copper Corporation - Toquepala*. Obtenido de Slides: <https://es.scribd.com/doc/169518756/minera-toquepala-pptx>.
- Gamarra G. y otros (2015). *Estadística e investigación con aplicaciones de SPSS (2ª ed.)*. Editorial San Marcos.
- Superintendencia de Geología Mina. (2018). Informe anual 2018. Obtenido de Superintendencia de Geología Mina: <https://www.smv.gob.pe/ConsultasP8/temp/SCC%20-%20MEMORIA%202018.pdf>.
- Camarena, A. (2019). *Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina*. Obtenido de Repositorio UNCP: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4966>
- Berrospi, E. (2024). *Reducción del costo de perforación incrementando la velocidad de penetración en el tajo de la Fase I de la Mina Toquepala*. Obtenido de Repositorio UNDAC: <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4442>

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala - Tacna, en 2024?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS: ¿Cuáles son los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación de la broca tricónica? ¿Cuáles son los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno? ¿Qué impacto tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL: Determinar la relación que existe entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS: Definir los factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación. Identificar los parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno. Identificar el impacto que tendrá para la empresa determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL: Existe una relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación de las brocas tricónicas en la Unidad Minera Toquepala – Tacna, en 2024.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS: Existen factores que influyen en la velocidad de penetración y el costo total de perforación Existen parámetros de perforación óptimos según el tipo de terreno. Determinar la relación entre la velocidad de penetración y el costo total de perforación generará un impacto económico positivo en la empresa.</p>	<p>VARIABLE 1 Velocidad de penetración Indicadores: Distancia total recorrida (m) Tiempo total de uso (hr)</p> <p>VARIABLE 2 Costo total de perforación Indicadores: Costo unitario de la broca (\$) Distancia total recorrida (m) Costo horario máquina (\$/hr) Velocidad de penetración (m/hr)</p>
MÉTODO Y DISEÑO	POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	
<p>TIPO Básica</p> <p>NIVEL Correlacional</p> <p>DISEÑO No experimental</p>	<p>POBLACIÓN Brocas tricónicas descartadas en la mina superficial del sur del Perú en el año 2024.</p> <p>MUESTRA Cada una de las brocas tricónicas descartadas</p>	<p>TÉCNICAS Recopilación de datos Análisis Documental</p> <p>INSTRUMENTOS Reportes de brocas consumidas obtenidos del sistema dispatch Software estadístico SPSS</p>	

ANEXO 2: Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Variable 1: Velocidad de penetración	“Este término es usado para determinar el rendimiento de las perforadoras y se mide mediante los metros perforados durante un tiempo determinado, es decir metros por horas o metros por minutos. El que determina las velocidades máximas de perforación es la broca o tricono que estemos usando, esta es nuestra limitante es por eso que debemos escoger adecuadamente la broca para el tipo de terreno en el vamos a trabajar”. (Alaya, 2018)	La velocidad de penetración se calcula dividiendo la distancia total recorrida de la broca entre el tiempo total de uso de la mismo, lo cual se expresa en (m/hr).	Rendimiento de la broca tricónica	Distancia total recorrida (m) Tiempo total de uso (hr)	Análisis documental	Reportes de brocas consumidas obtenidos del sistema dispatch
Variable 2: Costo total de perforación	“El mejor medio de determinar cuál es la broca ideal a utilizar es hacer una evaluación de los aspectos económicos. El costo total de perforación (TDC) es el costo parcial de perforación (PDC) incluyendo la productividad en la ecuación. El TDC incluye el costo de la broca, el rendimiento por hora del equipo de perforación, pies o metros por hora y distancia perforada. El costo parcial de perforación (PDC) es el precio al que se adquirió la broca dividido por la distancia que perfora”. (Castro,2019)	El costo total de perforación se calcula sumando costo unitario de la broca entre distancia total recorrida de la misma con costo horario máquina entre velocidad de penetración de la broca.	Parámetros clave de rendimiento	Costo unitario de la broca (\$) Distancia total recorrida (m) Costo horario máquina (\$/hr) Velocidad de penetración (m/hr)	Análisis documental	Reportes de brocas consumidas obtenidos del sistema dispatch