UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD EN LAS PERFORACIONES DIAMANTINAS EMPRESA GEODRILL, UTILIZANDO LA METODOLOGIA PHVA EN LA AMPLIACION DEL TAJO SUR COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCAY

PRESENTADO POR:

Br. WILBER JAVIER HUARACHA CHOQUEVILCA

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

Mg. RAIMUNDO MOLINA DELGADO

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Mgt. Reimundo Molina Delgado
..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: ....MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD EN LAS PERFORACIONES DIAMANTINAS EMPRESA GEODRILL, UTILIZANDO LA METODOLOGIA DUVA EN LA AMPLIACION DEL TAJO SUR COMPAÑIA MINERA HUANZALACAY

Presentado por: ....Wilber Javier Huarocha Choquevilca DNI N° : 45494854 ;

Presentado por: ..... DNI N° :.....

Para optar el título Profesional/Grado Académico de ..INGENIERO DE MINAS.....

.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ..01..veces, mediante el Software de Similitud Turnitin, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de ...7..... %.

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

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

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, ..17... de ..Setiembre.. de 20..26

.....

Firma

Post firma RAIMUNDO MOLINA DELGADO

Nro. de DNI ..23912083

ORCID del Asesor ..0000-0003-0291-2700

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Anti plagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259625517857

WILBER JAVIER HUARACHA CHOQUEVILCA

MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD EN LAS PERFORACIONES DIAMANTINAS EMPRESA GEODRILL, UTILIZANDO LA METOD...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:625517857

Fecha de entrega
16 sep 2026, 10:00 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
16 sep 2026, 10:12 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_JAVIER_HUARACHA_REP_01.docx

Tamaño del archivo
33.6 MB

153 páginas

25.696 palabras

152.921 caracteres

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 11 palabras)

Fuentes principales

5% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mi madre Facunda mujer con decisión y éxito que siempre me encaminó y motivó el logro de mis objetivos, a mis hermanos Luis, Livia y Yasmani por haberme inculcado los valores y el trabajo, como reconocimiento a su confianza y apoyo incondicional y a mi hija Dana por darme esa fuerza y motivo

Wilber Javier Huaracha Choquevilca

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más profundos agradecimientos a:

A Dios, nuestro Señor, por ser mi guía y compañía en cada momento a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje.

A la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Alma Mater que me ha acogido durante todos los años de mi formación académica profesional, enseñándome aspectos de la vida que ninguna clase formal pudiera enseñar.

A los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, y estuvieron siempre dispuestos a guiarme en los valores adecuados.

A todos mis compañeros, con quienes he formado una gran amistad y fraternidad durante toda mi carrera; gracias por ser tan buenos amigos.

A mis padres, hermanos e hija, quienes siempre han estado ahí para apoyarme y brindarme ánimo cuando las fuerzas desfallecen.

Asimismo, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, directa e indirectamente, han contribuido con su apoyo, comentarios, sugerencias y ayuda en el desarrollo de esta tesis.

Wilber Javier Huaracha Choquevilca

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

LISTA DE TABLAS x

LISTA DE FIGURAS xiii

ÍNDICE DE ABREVIATURAS xv

RESUMEN xvi

ABSTRACT xvii

INTRODUCCIÓN xviii

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.2.1. Problema General 2

1.2.2. Problemas Específicos 3

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.3.1. Justificación Técnica 3

1.3.2. Justificación Económica 3

1.3.3. Justificación Metodológica 4

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 4

1.4.1. Objetivo General 4

1.4.2. Objetivos Específicos 4
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 4
1.5.1. Delimitación Geográfica 4
1.5.2. Delimitación Temporal 5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL 6
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 6
2.1.1. Antecedentes Internacionales 6
2.1.2. Antecedentes Nacionales 8
2.2. MARCO CONCEPTUAL 9
2.2.1. Tipos de brocas de perforación diamantina 9
2.2.2. Gestión de Procesos 10
2.2.3. Control de Procesos 10
2.2.4. Indicadores de Desempeño (KPI) 11
2.2.5. Eficiencia 11
2.2.6. Eficacia 11
2.2.7. Optimización de procesos 11
2.2.8. Variabilidad operativa 12
2.2.9. Calidad del proceso 12
2.2.10. Desempeño operativo 12
2.3. BASES TEÓRICAS 13

2.3.1. Perforación diamantina 13
2.3.2. Sistemas de Perforación Diamantina 15
2.3.3. Equipos de Perforación Diamantina 18
2.3.4. Tipos de Sondaje Diamantino 20
2.3.5. Factores de Sondaje 22
2.3.6. Evaluación Técnica 25
2.3.7. Estándares Operacionales 26
2.3.8. Operaciones unitarias en perforación diamantina 27
2.3.9. Metodología PHVA 28
2.3.10. Diseño de malla de Perforación Diamantina 30
2.3.11. Rendimiento de la columna de perforación 32
2.3.12. Costos de Perforación Diamantina 33
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 34
2.4.1. Hipótesis General 34
2.4.2. Hipótesis Específicos 34
2.5. VARIABLES E INDICADORES 35
2.5.1. Variables Independiente 35
2.5.2. Variables Dependiente 35
2.5.3. Operacionalización de Variables 36
CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN 37

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 37
3.1.1. Tipo de Investigación.....37
3.1.2. Nivel de Investigación 37
3.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO.....38
3.3. TAMAÑO DE MUESTRA.....38
3.4. TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE MUESTRA.....38
3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 38
3.6. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....39
3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....39
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....40
4.1. PROCESO ACTUAL DE PERFORACIÓN DIAMANTINA.....40
4.1.1. Condiciones geológicas y geomecánicas 40
4.1.2. Descripción del Proceso de Perforación Diamantina en el Tajo Sur.....46
4.1.3. Secuencia Operativa del Proceso de Perforación 46
4.1.4. Condiciones Operativas Actuales.....49
4.1.5. Parámetros Actuales de Perforación.....52
4.1.6. Indicadores de desempeño evaluados antes de la Implementación PHVA ..54
4.1.7. Identificación de Problemas del Proceso 58
4.1.8. Costo unitario de perforación antes de la implementación 62
4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PHVA 63

4.2.1. Planificar 63

4.2.2. Hacer 68

4.2.3. Verificar 80

4.2.4. Actuar 91

4.3. RESULTADOS 109

4.3.1. Estimación Técnica, Económica 109

4.3.2. Categorización de los impactos 112

4.3.3. Cuadro comparativo entre estado anterior vs mejorado 113

4.4. DISCUSIÓN 114

4.4.1. Factores operacionales que afectan la productividad de la perforación diamantina 114

4.4.2. Influencia de la aplicación del ciclo PHVA en la productividad 114

4.4.3. Influencia de la optimización de parámetros operacionales en el rendimiento de perforación 115

4.4.4. Impacto económico de la mejora de productividad en la perforación diamantina 115

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 117

CONCLUSIONES 117

RECOMENDACIONES 118

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

ANEXOS 123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los tipos de sondaje diamantino.....22

Tabla 2 Cuadro de Operacionalización de Variables.....36

Tabla 3 Clasificación geomecánica y presencia litológica en las zonas del Tajo Sur 44

Tabla 4 Características técnicas del equipo de perforación GEO 3000.....51

Tabla 5 Rendimiento de perforación según tipo de terreno 52

Tabla 6 Influencia de la presión de avance 53

Tabla 7 Comportamiento del torque durante la perforación 53

Tabla 8 Funciones del fluido de perforación.....54

Tabla 9 Registro de avance de perforación diamantina – Segunda semana de febrero 2025 ..55

Tabla 10 Rendimiento de perforación diamantina (ROP) 56

Tabla 11 Registro referencial de recuperación de testigo.....57

Tabla 12 Control de desviación de sondajes diamantinos post perforación.....58

Tabla 13 Principales problemas identificados en el proceso de perforación diamantina.....59

Tabla 14 Resumen del costo unitario de perforación antes de la implementación 62

Tabla 15 Falencias operacionales identificadas en el equipo GEO 3000 durante la evaluación de línea base 64

Tabla 16 Parámetros operacionales estandarizados - perforación diamantina con equipo GEO 3000 74

Tabla 17 Aditivos utilizados y su aplicación durante la perforación diamantina 77

Tabla 18 Reporte operacional de avance de perforación diamantina por guardia – Marzo 2025 81

Tabla 19 Reporte operacional de avance de perforación diamantina por guardia – Abril 2025 83

Tabla 20 Análisis comparativo del promedio diario de avance perforado – Enero a junio 2025 84

Tabla 21 Análisis comparativo del ROP promedio – Enero a junio 2025 86

Tabla 22 Control de desviación de sondajes diamantinos post perforación – Mayo 2025 89

Tabla 23 Reducción de tiempos improductivos durante la implementación del ciclo PHVA90

Tabla 24 Evolución de la vida útil promedio de las brocas durante el periodo de evaluación 91

Tabla 25 Parámetros operacionales estandarizados para futuras campañas de perforación diamantina 92

Tabla 26 Programa de mantenimiento preventivo y correctivo del equipo de perforación diamantina 95

Tabla 27 Determinación del costo de mano de obra por metro perforado 101

Tabla 28 Determinación del costo de máquina perforadora por metro perforado 103

Tabla 29 Costo unitario de herramientas y otros materiales por metro perforado.....104

Tabla 30 Costo unitario de implementos de seguridad por metro perforado.....105

Tabla 31 Comparación del costo unitario de los materiales de perforación.....106

Tabla 32 Comparación del costo unitario de aditivos de perforación.....107

Tabla 33 Comparación del costo unitario de perforación antes y después de la implementación 108

Tabla 34 Comparación del costo total por sondaje antes y después de la implementación .108

Tabla 35 Resumen de indicadores técnicos obtenidos durante la implementación del ciclo PHVA 111

Tabla 36 Resumen de indicadores económicos obtenidos durante la implementación del ciclo PHVA 112

Tabla 37 Categorización de los impactos generados por la implementación del ciclo PHVA 113

Tabla 38 Comparación de indicadores antes y después de la implementación del ciclo PHVA 113

Tabla 39 Coordenadas de las principales áreas de la Unidad Minera Antapaccay 123

Tabla 40 Caracterización de las rutas de acceso hacia el Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay 126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de perforación diamantina en operaciones mineras 14

Figura 2 Esquema del proceso de perforación rotativa con broca cilíndrica.....16

Figura 3 Perforaciones diamantinas distribuidas en una malla de exploración 24

Figura 4 Ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) aplicado a la mejora continua de procesos 29

Figura 5 Plano de zonas geotécnicas del Tajo Norte y Tajo Sur – C.M. Antapaccay (marzo de 2025) 42

Figura 6 Corte transversal del Tajo Sur con zonas ZGS 43

Figura 7 Geometría y condiciones operativas del tajo abierto Antapaccay.....45

Figura 8 Motoniveladora realizando trabajos de nivelación de terreno en plataforma 47

Figura 9 Instalación y alineamiento del equipo de perforación diamantina en campo 47

Figura 10 Ejecución del sondaje mediante perforación diamantina en el Tajo Sur 48

Figura 11 Equipo de perforación diamantina GEO 3000 50

Figura 12 Comparación del avance de perforación respecto a la meta operacional diaria febrero 2025 56

Figura 13 Diagrama de Ishikawa de las causas de baja productividad en perforación diamantina 61

Figura 14 Sistema TruCore para monitoreo y control de trayectoria en perforación diamantina. 65

Figura 15 Actividades operacionales y mantenimiento preventivo – GEO 3000 69

Figura 16 Inspección mecánica de la perforadora diamantina GEO 3000 70

Figura 17 Control de desgaste de brocas diamantinas. 71

Figura 18 Configuración inicial e instalación del sistema TruCore en el tubo interior.....72

Figura 19 Instalación de extensión del tubo exterior del sistema TruCore.....73

Figura 20 Cartilla operacional de parámetros de perforación diamantina del equipo GEO 3000. 75

Figura 21 Cartilla operacional para el uso de aditivos en perforación diamantina del equipo GEO 3000 78

Figura 22 Capacitación operativa al personal de perforación diamantina.....79

Figura 23 Avance promedio por guardia respecto a la meta operacional durante el ciclo PHVA 85

Figura 24 Evolución del ROP promedio durante el ciclo PHVA.....87

Figura 25 Recuperación de testigos diamantinos en cajas portatestigos – 16 de mayo de 2025 88

Figura 26 Registro de mantenimiento preventivo del equipo de perforación – Abril 2025 94

Figura 27 Ficha operacional para el control del proceso de perforación diamantina.....99

Figura 28 Actividades operacionales durante la manipulación de tuberías de perforación...102

Figura 29 Máquina perforadora GEO 3000 utilizada en operaciones de perforación diamantina 103

Figura 30 Ubicación de operaciones de CM Antapaccay 124

Figura 31 Ubicación de las operaciones Tajo Sur y Tajo Norte de la CM Antapaccay 125

Figura 32 Plano de Franja Eocena-Oligocena del cinturón Andahuaylas-Yauri 129

Figura 33 Plano geológico---estructural del distrito minero de Tintaya.....131

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PHVA : Planificar, Hacer, Verificar y Actuar

ROP : Rate of Penetration (Velocidad de penetración)

RPM : Revoluciones por minuto

m/h : Metros por hora

m/día : Metros por día

m/guardia : Metros por guardia

HQ : Hole Quality (Diámetro HQ)

NQ : NQ Size (Diámetro NQ)

PQ : P Size Quality (Diámetro PQ)

TruCore : Sistema de control de desviación de sondajes

P.U. : Precio Unitario

RMR : Rock Mass Rating

CMA : Compañía Minera Antapaccay

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo mejorar la productividad de las perforaciones diamantinas ejecutadas por la empresa Geodrill mediante la aplicación del ciclo PHVA en la ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay, debido a factores que afectaban el desempeño operativo, como desviaciones en los sondajes, tiempos improductivos, variabilidad en los parámetros de perforación, uso no estandarizado de aditivos y limitaciones en la calidad de los resultados. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de nivel aplicado y diseño preexperimental, utilizando como unidad de análisis las perforaciones diamantinas ejecutadas durante el periodo de evaluación. La metodología comprendió el diagnóstico de la situación inicial, la implementación de acciones de mejora, la verificación de resultados y la evaluación de impactos. Los resultados evidenciaron que el avance promedio diario aumentó de 45.4 m/día a 52.4 m/día y los metros perforados por guardia de 22.6 a 26.2 m/guardia. Asimismo, el ROP aumentó de 3.9 m/h a 5.1 m/h, la recuperación de testigo de 87 % a 93 % y la desviación promedio se redujo de 2.51° a 1.35°. Los tiempos improductivos disminuyeron de 6.2 h/día a 3.2 h/día y el costo de perforación de 29.73 US$/m a 27.65 US$/m. Se concluye que la aplicación del ciclo PHVA mejoró la productividad, calidad y eficiencia económica de las perforaciones diamantinas.

Palabras clave: Ciclo PHVA, Perforación diamantina, Productividad, ROP, Mejora continua.

ABSTRACT

The objective of this research was to improve the productivity of diamond drilling operations carried out by Geodrill through the application of the PDCA cycle in the South Pit expansion of Compañía Minera Antapaccay, due to factors affecting operational performance, such as borehole deviation, non-productive time, variability in drilling parameters, non-standardized use of additives, and limitations in the quality of the results. The research was conducted under a quantitative approach, with an applied level and a pre-experimental design, using the diamond drilling operations carried out during the evaluation period as the unit of analysis. The methodology included the diagnosis of the initial situation, the implementation of improvement actions, the verification of results, and the evaluation of impacts. The results showed that the average daily drilling advance increased from 45.4 m/day to 52.4 m/day and the drilled meters per shift increased from 22.6 to 26.2 m/shift. Likewise, the ROP increased from 3.9 m/h to 5.1 m/h, core recovery increased from 87% to 93%, and the average deviation was reduced from 2.51° to 1.35°. Non-productive time decreased from 6.2 h/day to 3.2 h/day, and drilling cost decreased from US$ 29.73/m to US$ 27.65/m. It is concluded that the application of the PDCA cycle improved the productivity, quality, and economic efficiency of diamond drilling operations.

Keywords: PDCA Cycle, Diamond drilling, Productivity, ROP, Continuous improvement.

INTRODUCCIÓN

La exploración geológica constituye una etapa fundamental en el desarrollo de los proyectos mineros, siendo la perforación diamantina una de las principales técnicas para la obtención de información geológica confiable mediante la recuperación de testigos de roca. La eficiencia de este proceso depende del adecuado control de parámetros operativos, la selección de equipos, la estabilidad del taladro, la calidad de los fluidos de perforación y la gestión de las actividades de mantenimiento, factores que inciden directamente en la productividad, los costos operacionales y la calidad de la información obtenida.

En ese contexto, la presente investigación se desarrolla en la Compañía Minera Antapaccay, específicamente en la ampliación del Tajo Sur, donde se analiza el proceso de perforación diamantina ejecutado por la empresa Geodrill. El estudio propone la aplicación de la metodología PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) como herramienta de mejora continua para optimizar la productividad del proceso, mediante el control de las variables operativas, la reducción de tiempos improductivos y la mejora de los indicadores técnicos y económicos.

El Capítulo I presenta el planteamiento del problema de investigación, la formulación del problema general y los problemas específicos, los objetivos, la justificación, las hipótesis y la operacionalización de las variables.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, comprendiendo los antecedentes de investigación, las bases teóricas relacionadas con la perforación diamantina y la metodología PHVA, así como el marco conceptual que sustenta la investigación.

El Capítulo III describe la metodología de la investigación, considerando el tipo, nivel y diseño de investigación, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y el procedimiento para el procesamiento y análisis de la información.

El Capítulo IV desarrolla la investigación mediante la aplicación de la metodología PHVA al proceso de perforación diamantina. En este capítulo se presenta el diagnóstico del proceso actual, la planificación de las acciones de mejora, la implementación de las propuestas, la verificación de los resultados obtenidos y las acciones de estandarización y evaluación económica derivadas de la mejora continua.

El Capítulo V presenta los resultados y la discusión de la investigación. En esta etapa se exponen la estimación técnica y económica, la categorización de los impactos, la comparación entre la condición inicial y la condición mejorada, así como el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados y de la aplicación de la metodología PHVA.

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La minería constituye una actividad de gran importancia en la economía mundial y, especialmente, en el Perú, donde representa una fuente significativa de ingresos, impuestos, regalías y generación de empleo. En este contexto, la exploración minera cumple un rol fundamental, ya que permite identificar y ampliar los recursos minerales que garantizan la continuidad de las operaciones.

Dentro de estas actividades, la perforación diamantina es una técnica clave para la obtención de información geológica confiable, debido a que permite recuperar testigos representativos del macizo rocoso, los cuales sirven de base para la estimación de recursos minerales.

En la Compañía Minera Antapaccay, el planeamiento de vida de mina (LOM) considera recursos que permiten proyectar la operación hasta el año 2032, lo que genera la necesidad de intensificar las perforaciones diamantinas con fines de exploración. Sin embargo, las condiciones del material a perforar y las deficiencias en el control del proceso han generado dificultades en el cumplimiento de metas operativas.

Entre los principales problemas se encuentran las desviaciones en el control del azimut y el ángulo de inclinación (dip), originadas por la inestabilidad de las paredes del taladro, lo que genera errores en la trayectoria de los sondajes y afecta la estimación de los recursos minerales. Asimismo, el atascamiento de la columna de perforación ocasiona la pérdida del sondaje y de la información errónea obtenida, obligando a ejecutar nuevos accesos, plataformas y perforaciones, incrementando los costos y los tiempos de operación.

De igual manera, la baja calidad de los sondajes y la deficiente recuperación de testigos, producto del inadecuado control de los parámetros técnicos de perforación, afectan la confiabilidad de los datos geológicos. A ello se suma la limitada aplicación de tecnologías y controles operativos, lo cual restringe la productividad, incrementa los costos y dificulta el cumplimiento del presupuesto y de las metas establecidas.

Cabe señalar que esta problemática no es exclusiva de la mina Antapaccay, sino que se presenta en diversos proyectos de exploración minera a nivel nacional, afectando la calidad de la información geológica y la confiabilidad en la estimación de recursos minerales.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General

- ¿Como mejorar la productividad de las perforaciones diamantinas por Geodrill aplicando el ciclo PHVA en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son los factores que vienen perjudicando en el proceso de perforación diamantina por Geodrill en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay?
- ¿En qué medida la metodología PHVA permitirá mejorar el proceso de la perforación diamantina en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay?
- ¿Cuáles son los costos de avance lineal, en la perforación diamantina, con la aplicación del ciclo PHVA en el tajo sur, de la compañía minera Antapacay?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Justificación Técnica

Ante el incremento en los requerimientos de la planta concentradora de la Compañía Minera Antapaccay y la necesidad de ampliar las reservas minerales, resulta indispensable optimizar el proceso de perforación diamantina. La mejora en la calidad de los sondajes, especialmente en la estabilidad de las paredes del taladro y la adecuada recuperación de testigos, permitirá obtener información geológica más confiable y a mayores profundidades, contribuyendo a una mejor estimación de recursos minerales.

1.3.2. Justificación Económica

La optimización del proceso de perforación diamantina permitirá reducir costos operativos asociados a pérdidas de sondajes, reprocesos y tiempos de ejecución, asegurando el cumplimiento del presupuesto y los plazos establecidos. Asimismo, una mayor precisión en la estimación de recursos contribuye a una adecuada planificación minera y al aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles.

1.3.3. Justificación Metodológica

La aplicación de metodologías de mejora en el proceso de perforación diamantina permitirá establecer procedimientos más controlados y estandarizados, orientados a optimizar los parámetros operativos y mejorar la calidad de los resultados. Esto facilitará la obtención de testigos representativos y datos confiables, que podrán ser utilizados como referencia para otras operaciones de exploración minera en contextos similares.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

- Mejorar la productividad de las perforaciones diamantinas en la empresa Geodrill aplicando el ciclo PHVA en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la situación problemática actual del proceso de perforación diamantina en la empresa Geodrill en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay
- Mejorar la calidad de las perforaciones diamantinas aplicando el ciclo PHVA en el proceso de exploración en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay.
- Determinar los costos de avance lineal, la perforación diamantina, con la aplicación del ciclo PHVA en el tajo sur, de la compañía minera Antapaccay.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Delimitación Geográfica

La presente investigación se desarrolla en la unidad minera Antapaccay, específicamente en la zona correspondiente al tajo sur del yacimiento, donde se ejecutan las actividades de perforación diamantina para fines de exploración.

1.5.2. Delimitación Temporal

La investigación se desarrolla durante un periodo de seis meses, comprendido entre enero de 2025 y junio de 2025, tiempo en el cual se recopilan y analizan los datos operativos del proceso de perforación diamantina en la zona de estudio.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes Internacionales

- Salazar, Trefogli y Del Savio (2023) "**A VDC framework proposal for time optimization in diamond drilling operations for mining"** Artículo científico presentado en la International Group for Lean Construction – Francia.

El estudio aborda la ineficiencia en los tiempos de perforación diamantina en un proyecto de exploración minera ubicado en Huancavelica, donde se proyectó un metraje total de 13,278.06 m de perforación. La metodología fue aplicada con enfoque cuantitativo, basada en la implementación del modelo VDC mediante el análisis de datos operativos recolectados durante 5 meses, considerando variables como metros perforados por turno, horas efectivas y tiempos perdidos. Los resultados evidenciaron que el equipo de perforación alcanzó inicialmente un

rendimiento de 26.65 m/turno, el cual disminuyó a 22.46 m/turno, representando una reducción del 16% en productividad. Asimismo, se identificaron pérdidas de aproximadamente 300 m de perforación debido al cambio de equipos. La aplicación del modelo permitió optimizar los tiempos en un 10%, mejorando el control de las horas operativas y reduciendo la variabilidad del proceso, lo que contribuyó al cumplimiento de las metas de producción en perforación diamantina.

- Cao, Kozhevnykov, Dreus y Liu (2019) **"Diamond core drilling process using intermittent flushing mode"** Artículo científico publicado en Arabian Journal of Geosciences.

El estudio analiza la baja eficiencia en la perforación diamantina asociada a pérdidas de energía en el fondo de pozo durante el proceso de corte de roca. La metodología fue experimental, mediante ensayos de laboratorio en bloques de granito de categoría IX utilizando un equipo de perforación ZIF-300, evaluando variables como velocidad de penetración, carga axial, velocidad de rotación y potencia en fondo de pozo. Los resultados demostraron que la implementación del sistema de flushing intermitente incrementa la velocidad de penetración entre 1.18 y 2.2 veces respecto al método convencional. Asimismo, se evidenció que la eficiencia del proceso está directamente relacionada con la potencia en fondo de pozo y el factor de intermitencia, permitiendo una mejora significativa en la productividad de la perforación diamantina sin requerir cambios en el equipamiento utilizado.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

- Vergaray y Orihuela (2022) **"Propuesta de mejora para optimizar los tiempos de perforación efectiva con la finalidad de incrementar la productividad en una contrata de perforación diamantina de la Unidad Minera San Cristóbal aplicando ingeniería de métodos y TPM"** Trabajo de suficiencia profesional para optar el título de Ingeniero Industrial, presentada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas – Lima / Perú.

El estudio aborda la baja productividad en operaciones de perforación diamantina debido a tiempos improductivos y deficiencias en mantenimiento y recuperación de muestras, analizando una data operativa de 13 meses (2020–2021). La metodología fue aplicada con enfoque cuantitativo, utilizando herramientas de ingeniería de métodos, TPM y análisis de tiempos de producción. Los resultados evidenciaron diferencias entre la producción ejecutada y la proyectada, identificándose pérdidas asociadas a tiempos de stand by operativo e inoperativo, así como costos de oportunidad por baja eficiencia. El análisis de indicadores mostró que la producción real se encontraba por debajo de la capacidad de máquina durante todo el periodo evaluado. Tras la implementación de un plan piloto superior a 2 meses, se logró reducir los tiempos improductivos y mejorar los indicadores de producción, incrementando la eficiencia operativa del proceso de perforación diamantina.

- Alarcón y Balvin (2025) **"Optimización de parámetros de perforación con sistema diamantina para el control de desviación de la trayectoria del taladro en la U.M. Parcoy - Pataz La Libertad 2025"** Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, presentada en la Universidad Nacional de Huancavelica – Huancavelica / Perú.

El estudio analiza el problema de desviación en la trayectoria de taladros en perforación diamantina mediante la optimización de parámetros operacionales. La metodología fue de nivel explicativo con diseño cuasi experimental y enfoque cuantitativo, considerando una muestra de 2 taladros diamantinos y evaluando variables como presión de torque, presión de avance, velocidad de rotación y peso sobre la corona. Los resultados determinaron que una configuración óptima de presión de torque entre 2900–3000 PSI, presión de avance entre 900–1000 PSI, velocidad de rotación entre 1000–1200 RPM y peso sobre la corona entre 3100–3200 PSI permite reducir la desviación en DIP hasta 0.01° y en AZIMUTH hasta 0.08°, alcanzando una profundidad efectiva de 740 m. La prueba estadística de Kruskal-Wallis mostró diferencias altamente significativas ($p < 0.0001$), confirmando que la optimización de parámetros mejora la precisión y eficiencia del proceso de perforación diamantina.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Tipos de brocas de perforación diamantina

Las brocas diamantinas son herramientas de corte utilizadas para perforar formaciones rocosas mediante diamantes naturales o sintéticos incorporados en una matriz metálica. Según Boart Longyear (2014), las brocas se clasifican principalmente en:

2.2.1.1. Brocas de matriz impregnada (Impregnated Diamond Bits)

Contienen diamantes sintéticos distribuidos uniformemente en una matriz metálica que se desgasta progresivamente, exponiendo nuevos diamantes durante la perforación. Son las más utilizadas en exploración minera por su buen desempeño en formaciones de dureza media a muy alta.

2.2.1.2. Brocas de diamantes superficiales (Surface Set Diamond Bits)

Poseen diamantes fijados sobre la superficie de la matriz, por lo que ofrecen una mayor capacidad de corte en formaciones blandas a medianamente duras, aunque presentan menor vida útil en rocas altamente abrasivas.

2.2.1.3. Brocas PDC (Polycrystalline Diamond Compact)

Incorporan cortadores de diamante policristalino soldados sobre un cuerpo metálico. Se utilizan principalmente en perforación rotatoria de formaciones sedimentarias y, aunque su aplicación en perforación diamantina para exploración es limitada, ofrecen altas velocidades de penetración en terrenos homogéneos.

2.2.2. Gestión de Procesos

La gestión de procesos se define como el enfoque sistemático orientado a identificar, diseñar, ejecutar, controlar y mejorar los procesos organizacionales con el propósito de alcanzar resultados eficientes y alineados con los objetivos estratégicos. Según Harrington (1991), la gestión de procesos permite optimizar el desempeño mediante la estandarización y mejora continua de las actividades productivas. Asimismo, Davenport (1993) sostiene que este enfoque facilita la integración de actividades operativas, reduciendo la variabilidad y mejorando la productividad organizacional.

2.2.3. Control de Procesos

El control de procesos hace referencia al conjunto de técnicas y procedimientos utilizados para monitorear, evaluar y corregir el desempeño de un proceso en función de estándares previamente establecidos. De acuerdo con Montgomery (2009), el control permite identificar desviaciones y aplicar acciones correctivas oportunas para garantizar la estabilidad del proceso.

En este sentido, Juran (1990) señala que el control es un componente fundamental de la gestión de la calidad, ya que asegura que los resultados se mantengan dentro de niveles aceptables.

2.2.4. Indicadores de Desempeño (KPI)

Los indicadores clave de desempeño (Key Performance Indicators, KPI) son métricas utilizadas para evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos organizacionales y la eficiencia de los procesos. Según Kaplan y Norton (1996), los KPI permiten medir el desempeño de manera cuantitativa, facilitando la toma de decisiones estratégicas. Asimismo, Parmenter (2015) destaca que estos indicadores deben ser relevantes, medibles y alineados con los objetivos del proceso.

2.2.5. Eficiencia

La eficiencia se refiere a la capacidad de un proceso para utilizar de manera óptima los recursos disponibles en la obtención de resultados. Según Koontz y Weihrich (2012), la eficiencia implica hacer uso adecuado de los recursos con el mínimo desperdicio posible. En el ámbito productivo, este concepto se asocia directamente con la reducción de costos y el incremento del rendimiento operativo.

2.2.6. Eficacia

La eficacia se define como el grado en que se alcanzan los objetivos establecidos, independientemente de los recursos utilizados. De acuerdo con Robbins y Coulter (2014), un proceso es eficaz cuando logra los resultados esperados en función de las metas planteadas. Este concepto se diferencia de la eficiencia en que se enfoca en el logro de resultados más que en el uso de recursos.

2.2.7. Optimización de procesos

La optimización de procesos consiste en la aplicación de técnicas y herramientas orientadas a mejorar el rendimiento de un proceso mediante la reducción de tiempos, costos y variabilidad.

Según Hammer y Champy (1993), la optimización permite rediseñar procesos para lograr mejoras significativas en productividad y calidad. Asimismo, este enfoque busca maximizar el valor generado en cada etapa del proceso productivo.

2.2.8. Variabilidad operativa

La variabilidad operativa se refiere a las fluctuaciones o inconsistencias que se presentan en el desempeño de un proceso debido a factores internos o externos. Según Deming (1986), la variabilidad es una de las principales causas de ineficiencia en los procesos, por lo que su control resulta fundamental para garantizar resultados estables y predecibles. La reducción de la variabilidad contribuye directamente a la mejora de la calidad y productividad.

2.2.9. Calidad del proceso

La calidad del proceso se define como el grado en que un proceso cumple con los requisitos establecidos y produce resultados consistentes y confiables. Según Ishikawa (1985), la calidad no solo depende del resultado final, sino también del control de cada etapa del proceso. En este sentido, la mejora de la calidad está estrechamente relacionada con la reducción de errores y la estandarización de actividades.

2.2.10. Desempeño operativo

El desempeño operativo hace referencia al nivel de cumplimiento de los objetivos productivos en términos de eficiencia, calidad y productividad. De acuerdo con Slack et al. (2010), este concepto permite evaluar la capacidad de un sistema para generar resultados en condiciones óptimas. Asimismo, constituye un indicador clave para la mejora continua en procesos industriales.

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. Perforación diamantina

2.3.1.1. Definición de perforación diamantina

La perforación diamantina es un método de perforación rotatoria utilizado en la exploración minera y geológica, cuyo objetivo principal es la obtención de testigos continuos de roca para el análisis del subsuelo. Este método emplea coronas impregnadas con diamantes industriales, los cuales permiten perforar formaciones de alta dureza mediante un proceso de corte por abrasión (Azar & Samuel, 2007).

Asimismo, este tipo de perforación se caracteriza por recuperar muestras relativamente intactas, lo que facilita la evaluación de las propiedades geológicas, estructurales y mineralógicas del macizo rocoso. Su funcionamiento se basa en la transmisión de energía mecánica a través de una sarta de perforación hacia la broca, generando un corte anular que permite la recuperación del núcleo en el interior del barril portatestigo (Long, 2000).

Figura 1

Proceso de perforación diamantina en operaciones mineras



Nota: MDH Perforaciones (2026)

2.3.1.2. Principios de funcionamiento de la perforación diamantina

La perforación diamantina se basa en un principio de corte rotatorio por abrasión, en el cual una broca impregnada con diamantes industriales gira a alta velocidad mientras se aplica una fuerza axial sobre la roca. Esta combinación de rotación y presión permite fragmentar la formación rocosa de manera controlada, generando un corte anular que deja un núcleo central intacto (Azar & Samuel, 2007).

El sistema transmite energía mecánica desde la máquina perforadora hacia la broca mediante una sarta de perforación, permitiendo la penetración progresiva en el macizo rocoso. Durante este proceso, el testigo es alojado en el interior del barril portatestigo, mientras que los

detritos generados son evacuados a través de la circulación de fluidos de perforación, los cuales además cumplen funciones de enfriamiento y limpieza del fondo del pozo (Long, 2000).

Este principio operativo permite obtener muestras continuas y representativas del subsuelo, lo que convierte a la perforación diamantina en un método altamente eficiente para la exploración minera y geotécnica.

2.3.1.3. Consideraciones generales de la perforación diamantina

La perforación diamantina requiere la evaluación previa de diversos factores técnicos y geológicos que condicionan su eficiencia y calidad de ejecución. Entre los aspectos más relevantes se encuentra la selección adecuada de la broca diamantada, la cual debe estar en función de la dureza y características del macizo rocoso, ya que influye directamente en la velocidad de penetración y en la vida útil de la herramienta (Azar & Samuel, 2007).

Asimismo, es fundamental el control de los parámetros operativos, como la velocidad de rotación, la presión de avance y el caudal del fluido de perforación, los cuales deben ajustarse de acuerdo con las condiciones del terreno para evitar problemas como desgaste prematuro de la broca, desviaciones del taladro o pérdida de recuperación del testigo (Long, 2000).

Otro aspecto importante es la consideración de las condiciones geológicas del área, tales como la presencia de fracturas, fallas o agua subterránea, las cuales pueden afectar la estabilidad del pozo y la calidad de las muestras obtenidas. En este contexto, una adecuada planificación permite optimizar el proceso de perforación y reducir riesgos operacionales.

2.3.2. Sistemas de Perforación Diamantina

2.3.2.1. Perforación rotatoria

La perforación rotatoria constituye el principio fundamental sobre el cual se basa la perforación diamantina, ya que permite la fragmentación de la roca mediante la rotación continua

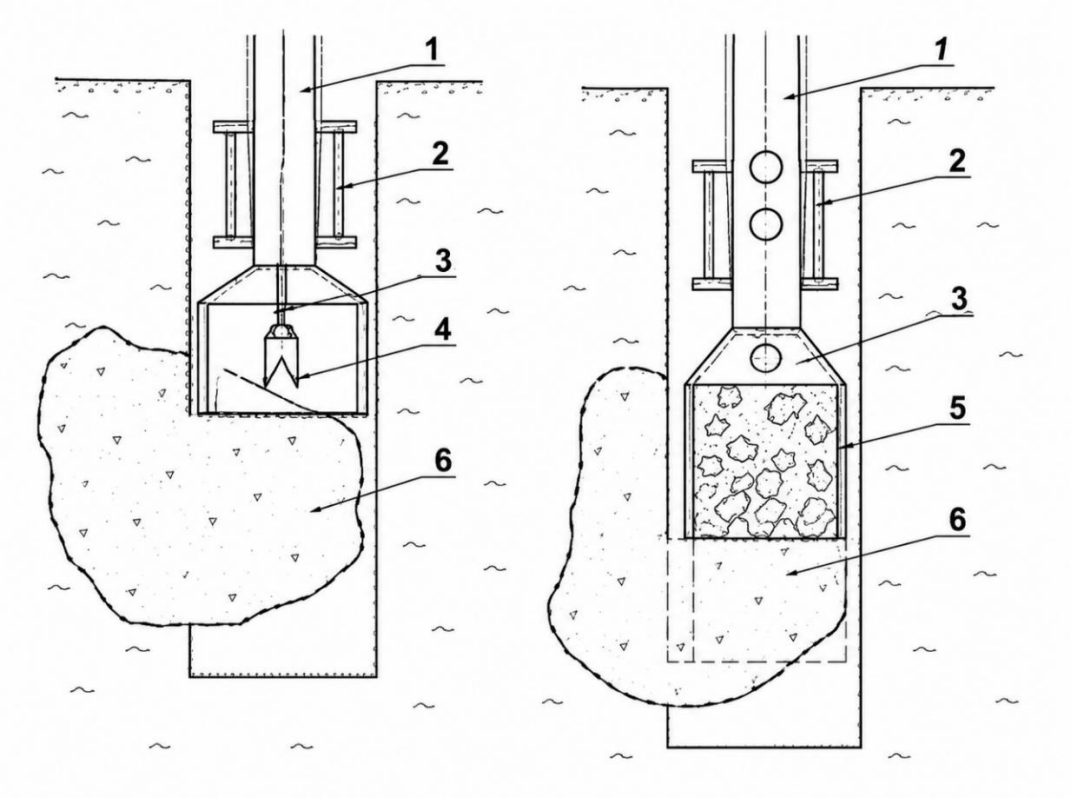
de una broca y la aplicación simultánea de una fuerza axial. Este sistema genera un proceso de corte por abrasión que facilita la penetración progresiva en el macizo rocoso (Azar & Samuel, 2007).

En este tipo de perforación, la energía mecánica es transmitida desde el equipo hacia la broca a través de la sarta de perforación, permitiendo que la rotación y la presión actúen conjuntamente para desintegrar la roca. Este mecanismo es altamente eficiente en formaciones duras, donde otros métodos de perforación presentan limitaciones operativas (Long, 2000).

Asimismo, la perforación rotatoria permite un control adecuado de parámetros como la velocidad de rotación, el peso sobre la broca y el avance, lo que contribuye a optimizar la recuperación del testigo y mejorar la productividad del proceso.

Figura 2

Esquema del proceso de perforación rotativa con broca cilíndrica



Nota: win-win-drill.com (2026)

Donde:

- 1. Sarta o columna de perforación: conjunto de barras que transmite el movimiento de rotación y el empuje desde la máquina hasta la herramienta de corte.
- 2. Revestimiento o tubería guía: estructura que estabiliza el pozo y evita el colapso de las paredes durante la perforación.
- 3. Cabezal o cuerpo de la herramienta perforadora: elemento que conecta la sarta de perforación con el sistema de corte o trituración.
- 4. Elemento de corte o trituración: componente encargado de fragmentar la roca mediante la acción combinada de rotación y presión axial.
- 5. Material fragmentado: roca triturada o detritos generados durante el proceso de perforación.
- 6. Formación rocosa o macizo rocoso: material geológico sobre el cual actúa la herramienta perforadora para generar el avance del pozo.

2.3.2.2. Línea de tuberías

La línea de tuberías, también denominada sarta de perforación, constituye el conjunto de elementos tubulares que transmiten la energía mecánica desde el equipo perforador hasta la broca diamantada. Esta transmisión permite generar la rotación y la presión necesarias para el avance del taladro en el macizo rocoso (Azar & Samuel, 2007).

La sarta de perforación está compuesta principalmente por barras de perforación, acoples y el barril portatestigo, los cuales trabajan de manera conjunta para asegurar la continuidad del proceso de perforación y la recuperación del núcleo. Asimismo, este sistema permite la circulación del fluido de perforación a través de su interior, facilitando la evacuación de detritos y el enfriamiento de la broca (Long, 2000).

El adecuado diseño y mantenimiento de la línea de tuberías es fundamental para evitar problemas operacionales como desviaciones del taladro, pérdidas de energía o atascamientos, los cuales pueden afectar la eficiencia y seguridad del proceso de perforación diamantina.

2.3.2.3. Fluido de perforación

El fluido de perforación es un componente fundamental en la perforación diamantina, ya que cumple funciones esenciales para el desarrollo eficiente del proceso. Este fluido, generalmente compuesto por agua y aditivos como bentonita, es utilizado para enfriar la broca, remover los detritos generados durante la perforación y estabilizar las paredes del pozo (Azar & Samuel, 2007).

Asimismo, la circulación continua del fluido permite transportar los recortes de roca hacia la superficie, evitando la acumulación de material en el fondo del taladro, lo cual podría generar atascamientos o disminuir la eficiencia de perforación. Además, contribuye a mantener la integridad del pozo al formar una película que reduce la permeabilidad de las formaciones atravesadas (Long, 2000).

El control adecuado de las propiedades del fluido, tales como viscosidad, densidad y caudal, resulta esencial para garantizar la estabilidad del sondaje y mejorar la recuperación de testigos durante la perforación diamantina.

2.3.3. Equipos de Perforación Diamantina

Los equipos de perforación diamantina son sistemas mecánicos utilizados en la exploración minera para realizar perforaciones en el macizo rocoso y obtener muestras del subsuelo. Estos equipos operan mediante el principio de rotación, transmitiendo energía hacia la broca a través de la sarta de perforación, lo que permite la penetración en la roca (Prassl, s.f.; Bourgoyne et al., 1986).

Asimismo, estos equipos están conformados por diversos sistemas integrados, como el sistema de rotación, izaje y circulación de fluidos, los cuales garantizan el adecuado desarrollo del proceso de perforación y la recuperación eficiente del testigo.

2.3.3.1. Tipos de Maquinarias de Perforación Diamantina

Los equipos de perforación diamantina pueden clasificarse principalmente según su sistema de accionamiento y operación, siendo los más comunes los equipos hidráulicos, eléctricos y neumáticos. Esta clasificación responde a la forma en que se genera y transmite la energía necesaria para el proceso de perforación (Pathak, s.f.).

Los equipos hidráulicos son los más utilizados en la actualidad debido a su mayor eficiencia y control operativo. Estos emplean sistemas de presión hidráulica para accionar los mecanismos de rotación y avance, permitiendo una perforación más precisa y estable, especialmente en trabajos de exploración profunda. Además, presentan menor nivel de vibraciones y mayor seguridad en comparación con otros sistemas (Bourgoyne et al., 1986).

Por otro lado, los equipos eléctricos utilizan motores eléctricos para generar el movimiento de rotación y avance, siendo adecuados en operaciones donde se dispone de una fuente de energía constante. Estos equipos destacan por su bajo nivel de emisiones y menor impacto ambiental.

Finalmente, los equipos neumáticos operan mediante aire comprimido, siendo generalmente utilizados en trabajos de menor profundidad o en condiciones donde se requiere mayor simplicidad operativa. Sin embargo, su uso ha disminuido frente a los sistemas hidráulicos debido a su menor eficiencia y control.

2.3.3.2. Características Técnicas

Las características técnicas de los equipos de perforación diamantina están definidas por los parámetros operativos que determinan su desempeño durante el proceso de perforación. Entre

los principales se encuentran la capacidad de profundidad, la velocidad de rotación, el torque y la fuerza de empuje, los cuales influyen directamente en la eficiencia de penetración y en la calidad del testigo recuperado (Bourgoyne et al., 1986).

Asimismo, estos equipos cuentan con sistemas que permiten el control de la inclinación y dirección del taladro, garantizando la precisión del sondaje. De acuerdo con la literatura técnica, el sistema de rotación y el sistema de izaje son componentes fundamentales, ya que permiten transmitir la energía necesaria hacia la broca y manipular la sarta de perforación durante las operaciones (Prassl, s.f.) .

Por otro lado, el sistema de circulación de fluidos constituye una característica clave, ya que permite la limpieza del fondo del pozo, el enfriamiento de la broca y la estabilidad de las paredes del taladro. Estos aspectos son esenciales para mantener la continuidad de la perforación y evitar problemas operacionales (Pathak, s.f.) .

En este contexto, la adecuada selección y control de las características técnicas del equipo permite optimizar el rendimiento de la perforación diamantina, reducir costos operativos y mejorar la calidad de la información geológica obtenida (Hartman, 1987) .

2.3.4. Tipos de Sondaje Diamantino

La perforación diamantina empleada en la exploración minera permite la obtención de muestras continuas del subsuelo mediante el uso de diferentes configuraciones de sondaje, las cuales se seleccionan en función de los objetivos del proyecto, las condiciones geológicas y la profundidad requerida. Este tipo de perforación es ampliamente utilizado para la recuperación de testigos que permiten evaluar las características del macizo rocoso (Pathak, s.f.) .

En el contexto de la ingeniería de perforación, los sondajes se clasifican principalmente de acuerdo con el diámetro del testigo recuperado, lo cual influye en la calidad de la información

geológica obtenida, así como en los costos y tiempos de operación. Esta clasificación constituye un criterio fundamental para el diseño de campañas de exploración (Hartman, 1987).

2.3.4.1. Perforación con BQ

El sistema BQ corresponde a un tipo de perforación diamantina de diámetro reducido, utilizado principalmente en etapas iniciales de exploración. Permite obtener testigos de aproximadamente 36.5 mm, lo que facilita una mayor velocidad de perforación y menores costos operativos (Boart Longyear, 2014).

Sin embargo, debido a su menor diámetro, presenta limitaciones en la recuperación del testigo, especialmente en formaciones fracturadas, lo que puede afectar la calidad de la información geológica.

2.3.4.2. Perforación con NQ

El sistema NQ es el más utilizado en exploración minera debido a su equilibrio entre costo y calidad de muestra. Produce testigos de aproximadamente 47.6 mm, permitiendo una adecuada caracterización geológica (Boart Longyear, 2014).

Se emplea en etapas intermedias de exploración y ofrece buena recuperación de testigo en diferentes condiciones geológicas.

2.3.4.3. Perforación con HQ

El sistema HQ utiliza un mayor diámetro de perforación, generando testigos de aproximadamente 63.5 mm. Se emplea cuando se requiere mayor calidad y representatividad de muestra, especialmente en estudios geotécnicos (Boart Longyear, 2014).

Su uso implica mayores costos y menor velocidad de perforación en comparación con BQ y NQ.

2.3.4.4. Perforación con PQ

El sistema PQ corresponde al mayor diámetro común en perforación diamantina, con testigos cercanos a 85 mm. Se utiliza en etapas avanzadas donde se requiere alta precisión en los análisis geológicos y geomecánicos (Boart Longyear, 2014).

Presenta alto costo operativo, mayor consumo de energía y menor velocidad de avance.

Tabla 1

Clasificación de los tipos de sondaje diamantino

Tipo de sondaje	Diámetro del testigo (mm)	Aplicación principal
BQ	36.5	Exploración inicial
NQ	47.6	Exploración intermedia
HQ	63.5	Estudios avanzados y geotécnicos
PQ	85	Estudios detallados y geomecánicos

Nota: Boart Longyear (2014)

2.3.5. Factores de Sondaje

Los factores de sondaje se definen como el conjunto de condiciones geológicas, técnicas y operativas que influyen directamente en el rendimiento de la perforación, afectando la velocidad de penetración, la recuperación del testigo y los costos del proceso. Estos factores deben ser evaluados de manera integral para garantizar la eficiencia y calidad del sondaje (Hartman, 1987).

2.3.5.1. Factores de Acuerdo al Tipo de Sondaje

2.3.5.1.1. Factores Geológicos

Los factores geológicos comprenden las características del macizo rocoso, tales como la dureza, el grado de fracturamiento, la estructura geológica y la presencia de agua. Estas condiciones influyen directamente en la velocidad de perforación y en la recuperación del testigo, pudiendo generar desviaciones o pérdidas de muestra (Hartman, 1987).

2.3.5.1.2. Factores Técnicos

Los factores técnicos están relacionados con los parámetros operativos del equipo de perforación, como la velocidad de rotación, la presión de avance, el tipo de broca y el control del fluido de perforación. La correcta combinación de estos parámetros permite optimizar el rendimiento del sondaje y reducir fallas operacionales (Hartman, 1987).

2.3.5.1.3. Factores Económicos

Los factores económicos se refieren a los costos asociados a la perforación, incluyendo el consumo de insumos, el desgaste de herramientas, el tiempo de operación y la productividad del equipo. Su control permite mejorar la eficiencia del proceso y reducir el costo por metro perforado (Hartman, 1987).

2.3.5.2. Parámetros de Perforación Diamantina

Los parámetros de perforación diamantina corresponden a las variables operativas que controlan el proceso de perforación y determinan su eficiencia, calidad de testigo y costo. Estos parámetros deben ser ajustados en función de las condiciones geológicas y los objetivos del sondaje, ya que influyen directamente en la velocidad de penetración y en la estabilidad del taladro (Bourgoyne et al., 1986).

2.3.5.2.1. Malla de Perforación o Tipos

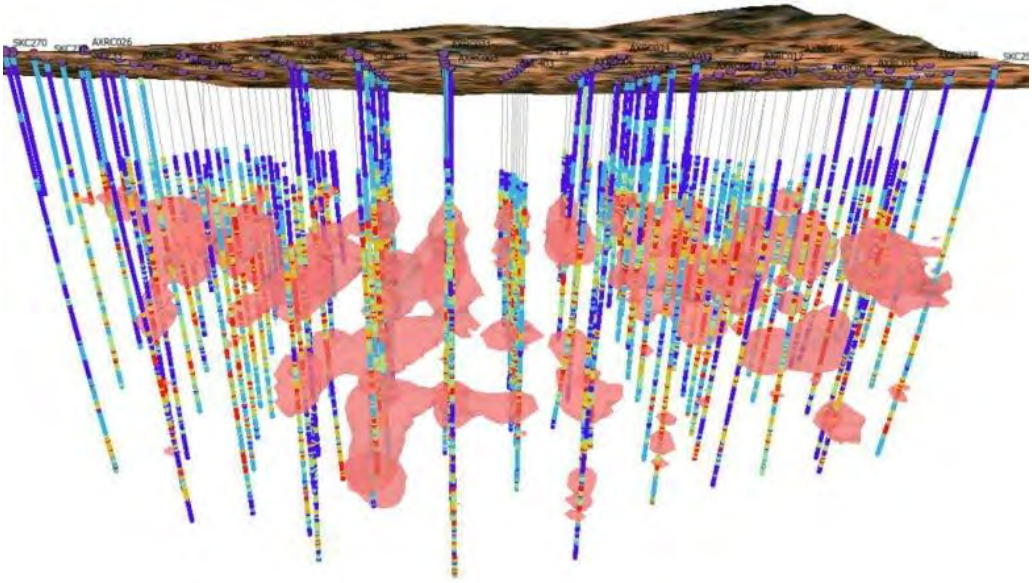
La malla de perforación se refiere a la disposición espacial de los sondajes dentro de un área determinada, definida en función de la densidad de información requerida. Esta puede variar desde mallas amplias en etapas preliminares hasta mallas más cerradas en etapas avanzadas de exploración.

Una adecuada definición de la malla permite optimizar la cantidad de perforaciones necesarias, reducir costos y garantizar una adecuada representación del yacimiento. La selección

del tipo de malla depende del objetivo del estudio, la variabilidad geológica y el nivel de detalle requerido (Hartman, 1987) .

Figura 3

Perforaciones diamantinas distribuidas en una malla de exploración



Nota: maxilift.com.ec

2.3.5.2.2. Dirección de la Perforación Diamantina

La dirección de la perforación diamantina corresponde a la orientación del taladro en el macizo rocoso, la cual puede ser vertical, inclinada u horizontal. La selección de la dirección depende de la geometría del yacimiento, la inclinación de las estructuras geológicas y los objetivos del sondaje.

Una correcta orientación permite interceptar adecuadamente las estructuras mineralizadas, mejorar la representatividad del testigo y reducir errores en la interpretación geológica. Por el contrario, una mala dirección puede generar desviaciones y pérdida de información relevante (Pathak, s.f.) .

2.3.5.2.3. Diámetro y Longitud de Perforación

El diámetro de perforación está directamente relacionado con el tipo de sondaje (BQ, NQ, HQ, PQ) y determina el tamaño del testigo recuperado. Un mayor diámetro permite obtener muestras de mejor calidad, pero incrementa los costos y reduce la velocidad de perforación.

Por otro lado, la longitud de perforación corresponde a la profundidad del sondaje y depende de los objetivos del proyecto y las características del yacimiento. A mayor profundidad, se incrementan las exigencias técnicas del equipo y los costos operativos. La adecuada selección de ambos parámetros es fundamental para lograr un equilibrio entre calidad de información y eficiencia del proceso (Bourgoyne et al., 1986).

2.3.6. Evaluación Técnica

La evaluación técnica del proceso de perforación diamantina se realiza mediante indicadores operativos que permiten medir el rendimiento y la calidad de la perforación.

2.3.6.1. Velocidad de penetración (ROP)

$$ROP = \frac{L}{T}$$

Donde:

- ROP: velocidad de penetración (m/h)
- L: longitud perforada (m)
- T: tiempo efectivo de perforación (h)

2.3.6.2. Recuperación de testigo (RT)

$$RT = \frac{L_r}{L_t} * 100$$

Donde:

- RT: recuperación de testigo (%)
- Lr: longitud recuperada (m)
- Lt: longitud total perforada (m)

2.3.6.3. Disponibilidad mecánica (DM)

$$DM = \frac{T_{operativo}}{T_{programado}} * 100$$

Donde:

- DM: disponibilidad mecánica (%)
- $Toperativo$: tiempo en operación (h)
- $Tprogramado$: tiempo programado (h)

2.3.7. Estándares Operacionales

Los estándares operacionales son lineamientos técnicos que establecen las condiciones adecuadas para la ejecución eficiente y segura de las actividades mineras, permitiendo uniformizar los procesos y reducir la variabilidad operativa. Según Hartman (2002), los estándares en minería constituyen herramientas fundamentales para garantizar el control de las operaciones y mejorar el desempeño productivo. Asimismo, Hustrulid (2013) señala que la aplicación de estándares operativos permite optimizar los recursos y minimizar errores en la ejecución de actividades mineras.

2.3.8. Operaciones unitarias en perforación diamantina

Las operaciones unitarias en perforación diamantina comprenden el conjunto de actividades secuenciales necesarias para la ejecución de un sondaje, las cuales se agrupan en fases pre-operativas, operativas y post-operativas, permitiendo estructurar, controlar y optimizar el proceso de perforación.

De acuerdo con Charles J. Boyles (2008), la perforación diamantina incluye una serie de actividades interrelacionadas que abarcan desde la preparación del sitio hasta la recuperación del testigo, las cuales influyen directamente en la eficiencia del proceso. Asimismo, Peter Darling (2011) señala que el análisis de las etapas operativas permite identificar pérdidas de tiempo y mejorar la productividad en perforación.

2.3.8.1. Operaciones Pre-Operativas

Son actividades previas necesarias para iniciar la perforación:

- Preparación de plataforma de perforación (nivelación y acondicionamiento del terreno).
- Construcción de accesos.
- Movilización del equipo.
- Instalación de la perforadora y accesorios.
- Alineamiento del taladro (azimut e inclinación).

Estas actividades garantizan condiciones adecuadas para la ejecución segura y eficiente del sondaje (Boyles, 2008).

2.3.8.2. Operaciones Operativas

Corresponden a las actividades principales del proceso:

- Perforación diamantina (rotación y avance).
- Adición de barras.

- Circulación de fluido de perforación.
- Extracción de testigo.
- Control de parámetros operativos (presión, RPM, avance).

Según Darling (2011), estas operaciones determinan el rendimiento del sistema de perforación y la calidad del testigo obtenido.

2.3.8.3. Operaciones Post-Operativas

Son actividades posteriores a la ejecución del sondaje:

- Registro geológico del testigo.
- Manipulación y almacenamiento en cajas.
- Cierre o sellado del taladro.
- Desmontaje del equipo.
- Rehabilitación del área intervenida.

Estas etapas permiten asegurar la trazabilidad de la información geológica y el cumplimiento de estándares ambientales (Boyles, 2008).

2.3.9. Metodología PHVA

La metodología PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), también conocida como ciclo de mejora continua, es un modelo de gestión orientado a la optimización de procesos mediante un enfoque sistemático y repetitivo. Este modelo fue desarrollado por W. Edwards Deming y es ampliamente aplicado en la gestión de calidad (Deming, 1986).

El ciclo PHVA se compone de cuatro etapas interrelacionadas:

- **Planificar (Plan):** Consiste en identificar problemas, establecer objetivos y definir los procesos necesarios para alcanzar los resultados esperados. En esta fase se analizan las condiciones actuales y se diseñan las acciones a implementar.

- **Hacer (Do):** Implica la ejecución de lo planificado. En esta etapa se desarrollan las actividades propuestas y se implementan los procesos definidos en la fase anterior.
- **Verificar (Check):** Corresponde a la evaluación de los resultados obtenidos, comparándolos con los objetivos establecidos. Se analizan desviaciones, errores o fallas en el proceso.
- **Actuar (Act):** Consiste en aplicar acciones correctivas o de mejora en función de los resultados obtenidos. Esta fase permite estandarizar mejoras o replantear el proceso, reiniciando el ciclo.

Este enfoque cíclico permite la mejora continua de los procesos, ya que cada iteración del ciclo genera retroalimentación que contribuye a optimizar el desempeño operativo.

Figura 4

Ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) aplicado a la mejora continua de procesos



Nota: Dirección de Desarrollo Estratégico, 2020

2.3.9.1. Ventajas

La metodología PHVA permite mejorar continuamente los procesos mediante un enfoque estructurado, facilitando la identificación de errores y la implementación de acciones correctivas.

Asimismo, contribuye a una mejor planificación y control de las actividades, optimizando el uso de recursos y mejorando la toma de decisiones basada en resultados (Deming, 1986).

2.3.9.2. Desventajas

La aplicación del ciclo PHVA requiere disciplina y seguimiento constante, lo que puede demandar mayor tiempo en su implementación. Además, depende del compromiso del personal y de una cultura organizacional orientada a la mejora continua, ya que su aplicación inadecuada puede limitar su efectividad.

2.3.10. Diseño de malla de Perforación Diamantina

El diseño de la malla de perforación diamantina consiste en definir la distribución de los sondajes en el terreno, considerando el espaciamiento, la longitud y la inclinación, con el fin de optimizar la operación y obtener información confiable del yacimiento (Hartman, 1987).

Desde el enfoque de productividad operativa, un buen diseño permite reducir fallas, evitar retrabajos y mejorar la eficiencia del proceso de perforación.

2.3.10.1.Definición del espaciamiento de la malla

El espaciamiento se define según la etapa del proyecto:

- Exploración inicial:
  - Mallas amplias (ejemplo: 100 m × 100 m)
  - Objetivo: obtener información general
  - Ventaja: menor costo
- Exploración intermedia:
  - Mallas medias (ejemplo: 50 m × 50 m)
  - Objetivo: mejorar la precisión de la información
- Exploración avanzada:

- Mallas cerradas (ejemplo: 25 m × 25 m o menor)
- Objetivo: alta precisión del yacimiento

A menor espaciamiento entre sondajes, se obtiene mayor cantidad y precisión de información geológica, pero con un incremento en los costos de perforación.

2.3.10.2.Definición de la longitud de perforación

La longitud del sondaje se define considerando:

- Profundidad del cuerpo mineralizado
- Información geológica disponible
- Objetivo del proyecto

Se busca:

- Interceptar completamente la zona mineralizada
- Evitar perforaciones cortas (pérdida de información)
- Evitar perforaciones excesivas (aumento de costos)

2.3.10.3.Definición de la inclinación y dirección

La inclinación del sondaje depende de la geometría del yacimiento:

- Perforación vertical:
  - Usada cuando el cuerpo es horizontal
  - Más simple operativamente
- Perforación inclinada:
  - Permite interceptar mejor vetas o estructuras
  - Mejora la calidad del testigo
- Se busca:
  - Interceptar correctamente el cuerpo mineralizado

- Reducir desviaciones del taladro
- Mejorar la interpretación geológica

2.3.11. Rendimiento de la columna de perforación

La columna de perforación está conformada por el conjunto de componentes que transmiten la rotación, el torque y el empuje desde la perforadora hasta la broca. Su rendimiento se evalúa mediante la vida útil de sus componentes, expresada como la cantidad de metros perforados antes de requerir su reemplazo por desgaste o pérdida de eficiencia. Según Bourgoyne et al. (1986), la vida útil constituye un indicador de desempeño que permite evaluar el comportamiento de las herramientas durante la perforación y establecer criterios para su reemplazo.

La vida útil se determina mediante la siguiente expresión:

$$VU = \frac{L_p}{N}$$

Donde:

- VU = Vida útil del componente (m/unidad).
- Lp = Longitud total perforada (m).
- N = Número de componentes reemplazados.

2.3.11.1.Barras de perforación

Las barras de perforación son componentes tubulares de acero de alta resistencia que integran la columna de perforación y tienen la función de transmitir el torque, la rotación y la carga axial desde el cabezal de la perforadora hasta la broca, además de permitir la circulación del fluido de perforación. Según Boart Longyear (2014), su rendimiento depende de la resistencia al desgaste, la integridad de las roscas, la resistencia a la fatiga y la capacidad para soportar esfuerzos de torsión y flexión durante la perforación. Un desgaste excesivo de las conexiones o deformaciones en las

barras disminuyen la eficiencia de transmisión de energía, incrementan el riesgo de desviación del sondaje y reducen la vida útil de la columna de perforación.

2.3.11.2.Brocas diamantinas

Las brocas diamantinas son herramientas de corte diseñadas para fragmentar la roca mediante diamantes naturales o sintéticos embebidos en una matriz metálica. De acuerdo con Boyles (2008), el rendimiento de una broca se expresa por la cantidad de metros perforados antes de alcanzar un nivel de desgaste que reduzca su capacidad de corte. Su desempeño está condicionado por la dureza y abrasividad de la formación rocosa, el tipo de matriz, la velocidad de rotación, el peso aplicado sobre la broca y la eficiencia del sistema de refrigeración y evacuación de detritus, factores que influyen directamente en la vida útil de la herramienta y en el costo de perforación por metro ejecutado.

2.3.12. Costos de Perforación Diamantina

La evaluación económica considera los costos directos e indirectos asociados a la perforación diamantina.

2.3.12.1.Costo Unitario (USD/m)

$$C_u = \frac{C_{total}}{L}$$

Donde:

- Cu: costo unitario (USD/m)
- $Ctotal$: costo total de perforación (USD)
- L: longitud total perforada (m)

El costo total incluye:

$$C_{total} = C_{mo} + C_{eq} + C_{ins} + C_{comb} + C_{mant} + C_{otros}$$

Donde:

- Cmo: costo de mano de obra
- Ceq: costo de equipos (depreciación + alquiler)
- $Cins$: insumos (brocas, barras, aditivos, lodos)
- $Ccomb$: combustible
- $Cmant$: mantenimiento
- $Cotros$: costos indirectos

2.3.12.2.Costo por taladro (USD/taladro)

$$C_{taladro} = C_u * L_t$$

Donde:

- $Ctaladro$: costo por taladro (USD)
- Cu: costo unitario (USD/m)
- Lt: longitud del taladro (m)

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Hipótesis General

- Aplicando el ciclo PHVA se incrementará la productividad de las perforaciones diamantinas en la empresa Geodrill, en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay.

2.4.2. Hipótesis Específicos

- La situación problemática actual en situación crítica del proceso de perforación diamantina en la empresa Geodrill en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay, requiere de una mejora.

- La aplicación del ciclo PHVA para la mejora continua, permitirá incrementar la calidad de las perforaciones diamantinas en el proceso de exploración en la ampliación de tajo sur, en la compañía minera Antapaccay.
- La aplicación del ciclo PHVA permitirá reducir los costos de avance lineal, e incrementar la productividad en la perforación diamantina, en el tajo sur, de la compañía minera Antapaccay.

2.5. VARIABLES E INDICADORES

2.5.1. Variables Independiente

X1: Aplicación del ciclo PHVA en la perforación diamantina

2.5.2. Variables Dependiente

Y1: Mejora de la Productividad.

2.5.3. Operacionalización de Variables

Tabla 2

Cuadro de Operacionalización de Variables

VARIABLE	DIMENSIÓN	DEFINICIÓN	INDICADOR	UNIDAD
X1: Aplicación del ciclo PHVA en la perforación diamantina **(Causa)**	Planear	Identificación de problemas, análisis de causas y planificación de mejoras en el proceso de perforación.	Número de problemas identificados	N°
			Número de acciones de mejora propuestas	N°
			Longitud programada de perforación	m
	Hacer	Ejecución de las acciones planificadas en campo durante la perforación diamantina.	Número de plataformas ejecutadas	N°
			Longitud de casing instalada	m
			Volumen de lodos preparados	m^3
	Verificar	Evaluación de los resultados mediante el control de parámetros operativos.	Desviación del taladro	°
			Presión de perforación	bar
			Recuperación de testigo	%
	Actuar	Implementación de acciones correctivas y estandarización del proceso.	Número de acciones correctivas aplicadas	N°
			Reducción de errores operativos	%
Y1: Mejora de la productividad **(Efecto)**	Productividad	Nivel de producción alcanzado en relación al tiempo de operación.	Metros perforados por guardia	m/guardia
			Metros perforados por hora	m/h
	Eficiencia	Relación entre el tiempo efectivo y el tiempo total de operación.	Tiempo efectivo de perforación	%
			Tiempo improductivo	h
	Calidad	Cumplimiento de estándares técnicos del proceso.	Recuperación de testigo	%
			Desviación del taladro	°
	Costos	Recursos económicos utilizados en la perforación.	Costo por metro perforado	$/m
			Consumo de aditivos por metro	kg/m

Nota: Elaboración Propia

CAPÍTULO III:

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es aplicada, debido a que utiliza conocimientos teóricos existentes para resolver un problema específico de la realidad operativa, como es la baja productividad en el proceso de perforación diamantina. Según Santiago Valderrama Mendoza, la investigación aplicada se orienta a la utilización de la teoría para generar soluciones prácticas que permitan mejorar procesos y controlar situaciones reales (Valderrama, 2014, p. 39). En este contexto, se aplica el ciclo PHVA como herramienta de mejora continua para optimizar el desempeño del proceso.

3.1.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación es correlacional–explicativo, ya que busca determinar la relación entre la aplicación del ciclo PHVA y la mejora de la productividad, así como explicar el efecto de la variable independiente sobre la dependiente. Según Roberto Hernández Sampieri, el nivel

correlacional mide la relación entre variables y el explicativo analiza relaciones de causa–efecto mediante hipótesis (Hernández Sampieri et al., 2014). En este contexto, se evalúa la influencia del ciclo PHVA en los indicadores de productividad del proceso de perforación diamantina.

3.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población está conformada por todos los sondajes diamantinos correspondientes al programa de perforación exploratoria, con profundidades entre 600 y 800 metros, ejecutados en las plataformas y bancos de la compañía minera Antapaccay.

3.3. TAMAÑO DE MUESTRA

La muestra está constituida por los sondajes diamantinos de mayor profundidad, seleccionados por ser representativos desde el punto de vista operacional, con profundidades de hasta 800 metros ejecutados en las plataformas de la zona sur de la compañía minera Antapaccay.

3.4. TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE MUESTRA

El tipo de muestreo es no probabilístico por conveniencia (Hernández Sampieri et al., 2014)., debido a que se seleccionan unidades de análisis en función de su accesibilidad y relevancia para los objetivos de la investigación.

3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se utilizan técnicas de investigación orientadas a la obtención de información del proceso de perforación diamantina.

- Técnicas:
  - Análisis documental
  - Observación directa
  - Trabajo de campo

3.6. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se emplean instrumentos que permiten registrar y sistematizar la información obtenida durante el proceso de investigación.

- Instrumentos:
  - Ficha de registro de datos
  - Libreta de campo
  - Registros operativos in situ
  - Fotografías
  - Planos técnicos

3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se utilizan herramientas informáticas y métodos estadísticos para procesar y analizar la información obtenida.

- Herramientas y análisis:
  - Microsoft Excel, Word y PowerPoint
  - AutoCAD y AutoCAD Civil 3D
  - Estadística descriptiva
  - Evaluación operacional diaria, semanal y mensual

CAPÍTULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROCESO ACTUAL DE PERFORACIÓN DIAMANTINA

El análisis del estado actual del proceso de perforación diamantina permite identificar las condiciones operativas en las que se desarrolla la actividad, así como las principales limitaciones técnicas que afectan su desempeño. Este análisis constituye la base para establecer una línea base del proceso y determinar oportunidades de mejora orientadas a incrementar la productividad mediante la aplicación del ciclo PHVA.

4.1.1. Condiciones geológicas y geomecánicas

La ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay presenta condiciones geológicas y geomecánicas variables, asociadas a la distribución de diferentes unidades litológicas, zonas de alteración y estructuras de fracturamiento. La información geomecánica utilizada fue proporcionada por el área de Geotecnia de Antapaccay.

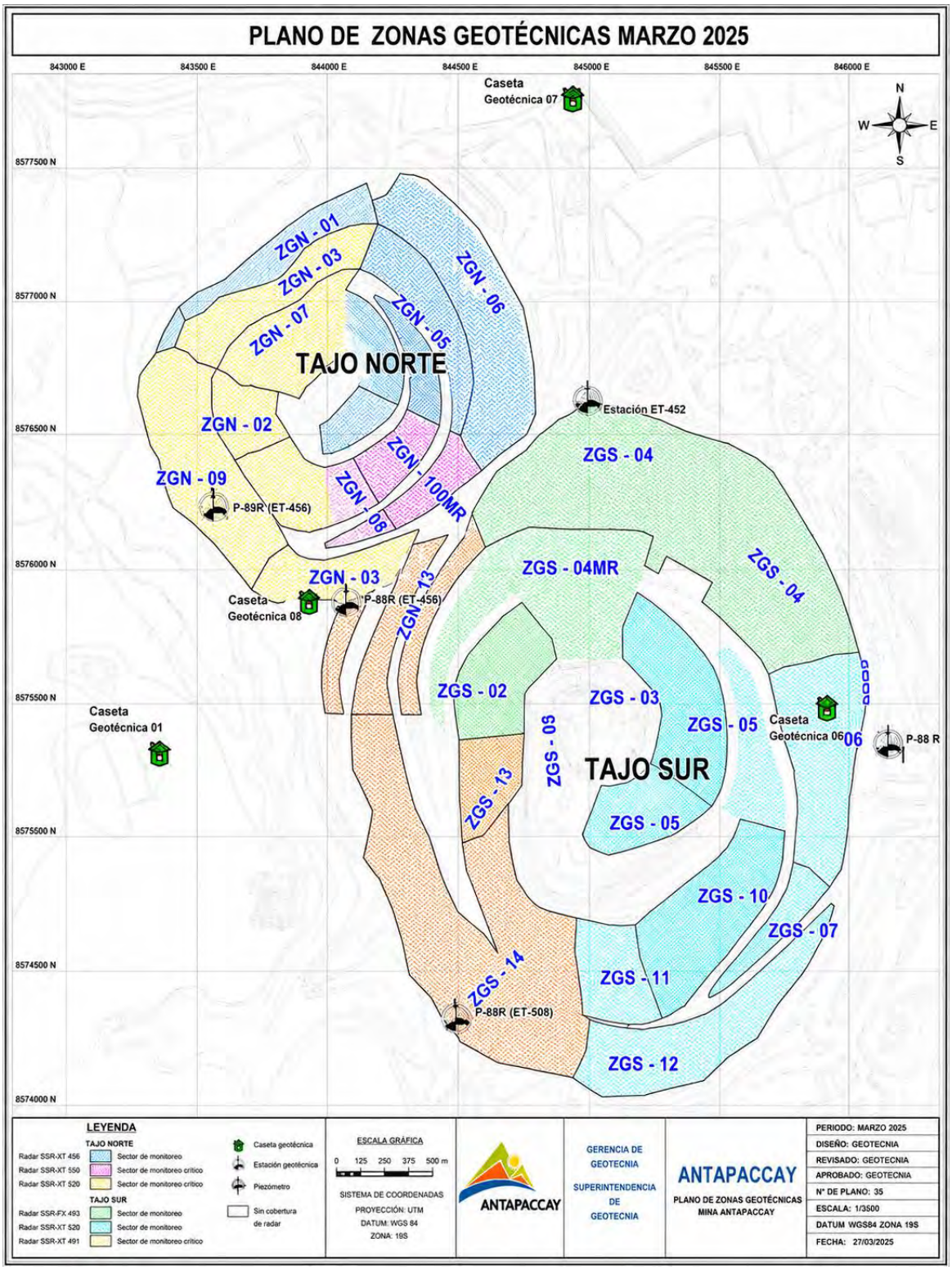
Geológicamente, en el Tajo Sur predominan rocas intrusivas de composición intermedia, principalmente pórfidos y dioritas, que intruyen las calizas de la Formación Ferrobamba. Para Antapaccay Sur se reportan afloramientos de Pórfido 80, Pórfido 74 y diorita; además, en los contactos entre los intrusivos y las calizas se desarrollan zonas de skarn, mientras que superficialmente se presentan tobas, unidades del Grupo Maure y depósitos cuaternarios.

La alteración hidrotermal y el fracturamiento modifican localmente la competencia de estas rocas. En los intrusivos predomina la alteración potásica, mientras que los contactos con las calizas presentan desarrollo de skarn; asimismo, el Tajo Sur presenta fallas y fracturas con orientaciones predominantes NNW–NW y NE. Estas condiciones influyen en la estabilidad del taladro, recuperación de testigo y circulación del fluido durante la perforación diamantina.

La Figura 5 presenta la zonificación geotécnica correspondiente a marzo de 2025. En el Tajo Sur se identifican los dominios ZGS-02, ZGS-03, ZGS-04, ZGS-04MR, ZGS-05, ZGS-06, ZGS-07, ZGS-08, ZGS-10, ZGS-11, ZGS-12, ZGS-13 y ZGS-14.

Figura 5

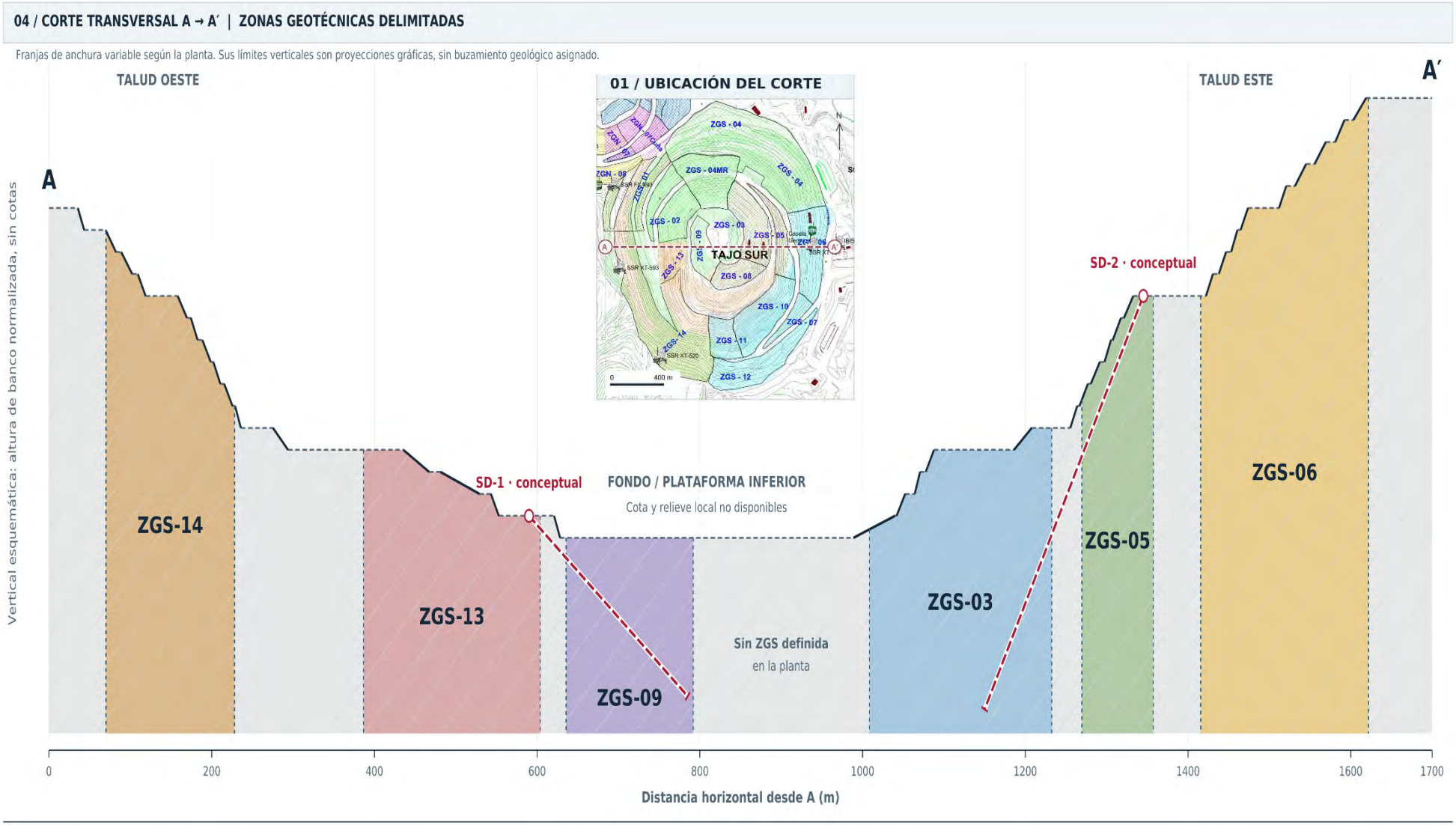
Plano de zonas geotécnicas del Tajo Norte y Tajo Sur – C.M. Antapaccay (marzo de 2025)



Nota. Plano de zonas geotécnicas correspondiente a marzo de 2025.

Figura 6

Corte transversal del Tajo Sur con zonas ZGS



Nota. Plano de zonas geotécnicas correspondiente a marzo de 2025.

A partir de la zonificación geotécnica y de la información geológica disponible para el Tajo Sur, se presenta la relación referencial entre los dominios geotécnicos, su clasificación RMR y las principales litologías presentes en los sectores correspondientes.

Tabla 3

Clasificación geomecánica y presencia litológica en las zonas del Tajo Sur

Zonas geotécnicas	Sector	Litologías presentes o asociadas	RMR representativo	Clase	Calidad
ZGS-02, ZGS-04 y ZGS-04MR	Norte–noroeste	Pórfidos, diorita y zonas de contacto con calizas	55	IIIA	Regular A
ZGS-03 y ZGS-05	Central	Pórfidos monzoníticos y diorita; presencia local de zonas de skarn	46	IIIB	Regular B
ZGS-06 y ZGS-10	Este–noreste	Caliza–mármol, skarn y contactos con cuerpos intrusivos	46	IIIB	Regular B
ZGS-11 y ZGS-12	Sur–sureste	Caliza–mármol, skarn y rocas de contacto	46	IIIB	Regular B
ZGS-07 y ZGS-08	Este–sureste	Caliza–mármol, skarn y sectores fracturados de contacto	35	IVA	Mala A
ZGS-13	Oeste–suroeste	Diorita, pórfidos y rocas de contacto intrusivo–carbonatado	35	IVA	Mala A
ZGS-14	Suroeste	Diorita, caliza–mármol y zonas de contacto	26	IVB	Mala B

Nota. Elaboración propia con base en el plano de zonas geotécnicas

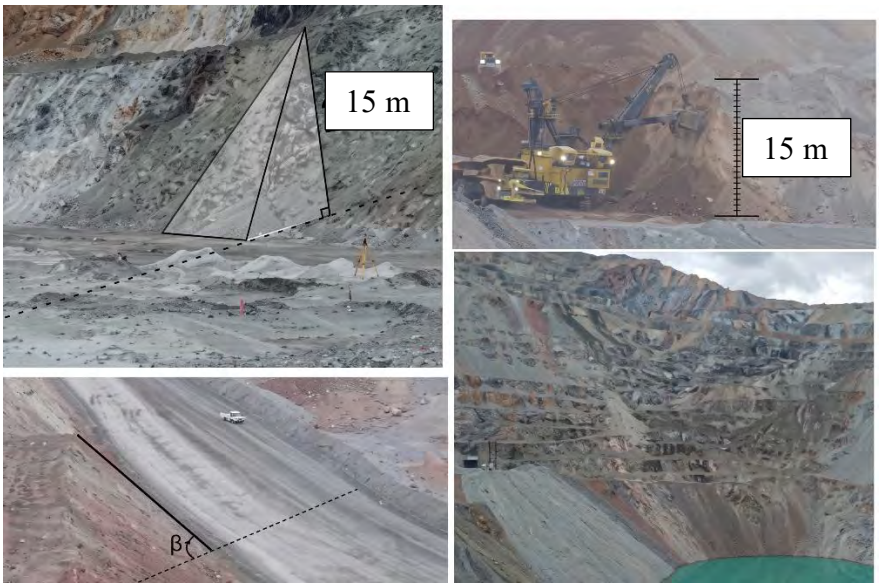
La Tabla 3 muestra que los sectores centrales y norte del Tajo Sur presentan principalmente unidades intrusivas constituidas por pórfidos y dioritas, mientras que hacia los sectores oriental, suroriental y zonas de contacto adquieren mayor importancia las calizas de la Formación Ferrobamba, mármol y skarn. Esta distribución no debe interpretarse como una equivalencia única entre cada código ZGS y un tipo de roca, debido a que una zona geotécnica puede interceptar más de una unidad litológica.

Las zonas ZGS-02, ZGS-04 y ZGS-04MR presentan una calidad Regular A (RMR = 55); ZGS-03, ZGS-05, ZGS-06, ZGS-10, ZGS-11 y ZGS-12 corresponden a Regular B (RMR = 46); ZGS-07, ZGS-08 y ZGS-13 presentan calidad Mala A (RMR = 35); mientras que ZGS-14 corresponde a Mala B (RMR = 26). Esta clasificación corresponde a la caracterización que ya se utiliza en la investigación.

Desde el punto de vista de la perforación diamantina, las principales dificultades se concentran en zonas fracturadas, alteradas y contactos entre intrusivos, calizas y skarn, donde pueden presentarse pérdida de circulación, inestabilidad de las paredes del taladro, disminución de la recuperación del testigo, atascamiento de la sarta y desviación del sondaje. En consecuencia, la calidad geomecánica no depende únicamente del tipo de roca, sino también de su grado de alteración, fracturamiento y condición estructural.

Figura 7

Geometría y condiciones operativas del tajo abierto Antapaccay



Nota: Imagen extraída de estudio geotécnico de Compañía Minera Antapaccay

La geometría de los bancos y taludes, conjuntamente con la variabilidad geológica y geomecánica descrita, condiciona la ubicación y estabilidad de las plataformas de perforación, por

lo que estas condiciones son consideradas durante el posicionamiento del equipo y la ejecución de los sondajes diamantinos.

4.1.2. Descripción del Proceso de Perforación Diamantina en el Tajo Sur

El proceso de perforación diamantina en el Tajo Sur de la Antapaccay se utiliza principalmente para el desarrollo de perforaciones tipo infill, las cuales permiten densificar la información del yacimiento y mejorar la estimación de recursos minerales.

A través de la recuperación de testigos de roca, es posible obtener información geológica detallada, incluyendo la identificación de litologías, estructuras, alteraciones y la caracterización de leyes minerales. Esta información resulta fundamental para la interpretación geológica del yacimiento y la toma de decisiones para el área de Planeamiento de la Compañía que solicita el servicio de Geodrill.

4.1.3. Secuencia Operativa del Proceso de Perforación

La perforación diamantina sigue una secuencia operativa estándar que va desde la preparación de la plataforma y culmina en la recuperación del testigo. Cada etapa impacta directamente en la productividad del sondaje, especialmente en metros perforados por guardia, recuperación y control de desviación.

4.1.3.1. Preparación de Plataforma

Primero se habilita el área de perforación (Véase Figura 8) mediante nivelación y acondicionamiento del terreno para asegurar estabilidad del equipo. Se define la ubicación de la poza de lodos y accesos. Una mala plataforma genera problemas desde el inicio: inclinación incorrecta del equipo, vibraciones y desviaciones en el taladro.

Figura 8

Motoniveladora realizando trabajos de nivelación de terreno en plataforma



Nota: Elaboración propia

4.1.3.2. Instalación del Equipo

La empresa Geodrill posiciona y nivela el equipo (Véase Figura 9). Luego se realiza el alineamiento del sondaje, controlando azimut y Dip según el requerimiento de compañía. Este punto es crítico, puesto que, si el equipo arranca mal alineado, el taladro se desvía y se pierde precisión en las condiciones geométricas de profundidad y dirección del sondaje.

Figura 9

Instalación y alineamiento del equipo de perforación diamantina en campo



Nota: Elaboración propia

4.1.3.3. Ejecución del Sondaje

Al iniciar la perforación se considera el control de los parámetros operativos tales como; RPM, presión de avance (WOB), torque y caudal de fluido.

La sarta transmite la rotación a la broca diamantada y el fluido limpia el fondo, enfría la corona y estabiliza el taladro.

En esta etapa se concentran los principales problemas:

- Atascamientos
- Pérdida de circulación
- Desgaste de broca cilindrica
- Variabilidad en el ROP

Todo esto afecta directamente el rendimiento del equipo y el costo asociados por metro.

Figura 10

Ejecución del sondaje mediante perforación diamantina en el Tajo Sur



Nota: Elaboración propia

4.1.3.4. Recuperación de Testigo

Se realiza mediante sistema wireline, sacando el núcleo sin desmontar la sarta.

El testigo se coloca en cajas para logueo geológico, donde se evalúa:

- Litología
- Estructuras
- Alteración
- Leyes minerales

La recuperación (%) es clave: si es baja, se pierde información y el sondaje pierde valor.

4.1.4. Condiciones Operativas Actuales

Las condiciones operativas actuales influyen directamente en el rendimiento del sondaje, la recuperación de testigo y la estabilidad del taladro. Estas condiciones comprenden factores geológicos, geomecánicos y técnicos asociados al comportamiento del macizo rocoso, al desempeño del equipo de perforación y al control de los fluidos utilizados durante la operación.

Analizar estas condiciones permite identificar las principales limitaciones operativas que afectan la productividad de la perforación, constituyendo una línea base para la aplicación de la Metodología PHVA. Asimismo, facilita evaluar el comportamiento actual de la perforación diamantina y establecer parámetros de control orientados a optimizar el desempeño operativo y reducir falencias operativas durante la ejecución de los sondajes.

4.1.4.1. Características técnicas del equipo de perforación

La perforación diamantina en la ampliación del Tajo Sur de Antapaccay es ejecutada mediante equipos de perforación diamantina superficie modelo GEO 3000, operados por la empresa Geodrill. Este equipo es utilizado para la ejecución de sondajes diamantinos de

exploración y recuperación de testigos en diferentes profundidades. Véase la máquina perforadora en la Figura 11.

Figura 11

Equipo de perforación diamantina GEO 3000



Nota: Elaboración propia

El equipo GEO 3000 trabaja mediante sistema wireline para recuperación continua de testigos y control operacional durante la perforación diamantina. Véase sus características Técnicas en la Tabla 4.

Tabla 4

Características técnicas del equipo de perforación GEO 3000

Parámetro	Característica
Modelo de equipo	GEO 3000
Tipo de perforación	Perforación diamantina superficie
Potencia del equipo	215 HP
Sistema de recuperación	Wireline
Capacidad línea PQ	250 m
Capacidad línea HQ	600 m
Capacidad línea NQ	800 m
Capacidad línea BQ	1200 m

Nota: Geodrill (2025)

El equipo GEO 3000 permite ejecutar sondajes diamantinos en diferentes diámetros de perforación según la profundidad y condiciones geológicas del terreno.

4.1.4.2. Control de fluidos de perforación

El control de fluidos de perforación en los sondajes diamantinos permite refrigerar la broca, evacuar detritos y estabilizar las paredes del taladro durante la perforación.

En las operaciones ejecutadas por Geodrill S.A.C. en Antapaccay se identificó que el uso inadecuado del lodo de perforación generaba pérdida del taladro, mayor consumo de aditivos y disminución del avance de perforación.

El control operacional del fluido considera principalmente:

- viscosidad,
- caudal de circulación,
- presión de bombeo,
- limpieza del taladro,
- refrigeración de la broca.

Durante la perforación diamantina se utilizan aditivos para mejorar la estabilidad del sondaje y reducir pérdidas operacionales. Entre los principales aditivos utilizados se encuentran bentonita, PAC, Polyplus, Poly Lube y Black Hole, empleados para incrementar viscosidad, controlar filtraciones, estabilizar zonas fracturadas y disminuir fricción durante la perforación.

4.1.5. Parámetros Actuales de Perforación

La perforación diamantina en el Tajo Sur se desarrolla mediante el control de parámetros operacionales que influyen directamente en el rendimiento y estabilidad del sondaje.

4.1.5.1. Velocidad de rotación (RPM)

La velocidad de rotación corresponde al número de revoluciones que realiza la sarta de perforación durante el corte de la roca. Este parámetro influye directamente en la velocidad de penetración, desgaste de broca y estabilidad del taladro.

En las operaciones de perforación diamantina desarrolladas por Geodrill S.A.C. en Antapaccay, el rendimiento de avance registrado fue de aproximadamente 7 pulg/min en terreno compacto y 4 pulg/min en terreno fracturado utilizando brocas Geodrill.

Tabla 5

Rendimiento de perforación según tipo de terreno

Tipo de terreno	Rendimiento promedio
Terreno compacto	7 pulg/min
Terreno fracturado	4 pulg/min

Nota: Geodrill S.A.C. – Antapaccay

4.1.5.2. Presión de avance

La presión de avance es la fuerza aplicada sobre la broca diamantina para permitir la penetración en el macizo rocoso. Su control influye directamente en el rendimiento de perforación y estabilidad del sondaje.

En Antapaccay, la perforación diamantina se desarrolla principalmente en rocas tipo monzonita, diorita y caliza, presentando variaciones de dureza y fracturamiento que afectan la presión aplicada durante la perforación.

Tabla 6

Influencia de la presión de avance

Condición	Efecto operacional
Baja presión	Disminución del avance
Presión adecuada	Mejor penetración y estabilidad
Exceso de presión	Mayor desgaste y desviación

Nota: Elaboración propia

4.1.5.3. Torque

El torque representa la fuerza de giro transmitida desde el cabezal de perforación hacia la sarta y la broca diamantina durante el corte de roca.

Su variación depende principalmente del tipo de roca, condiciones de fracturamiento y desgaste de herramientas durante el avance del sondaje.

Tabla 7

Comportamiento del torque durante la perforación

Condición del terreno	Comportamiento del torque
Roca compacta	Torque estable
Zona fracturada	Variación irregular
Desgaste de broca	Incremento del torque

Nota: Elaboración propia

4.1.5.4. Caudal de fluido

El caudal de fluido permite evacuar detritos, refrigerar la broca diamantina y estabilizar las paredes del taladro durante la perforación diamantina.

En Antapaccay se utilizan sistemas de almacenamiento y manejo de lodos de perforación para mantener la circulación del fluido durante los sondajes diamantinos.

Tabla 8

Funciones del fluido de perforación

Función	Aplicación operacional
Refrigeración	Disminuye temperatura de la broca
Limpieza	Evacúa detritos del taladro
Estabilización	Reduce colapso del sondaje
Lubricación	Disminuye fricción de la sarta

Nota: Elaboración propia

4.1.6. Indicadores de desempeño evaluados antes de la Implementación PHVA

Para la evaluación de la línea base operacional se consideraron indicadores de desempeño relacionados con la productividad, rendimiento de perforación, recuperación de testigos, control del sondaje y costos operacionales de la perforación diamantina.

4.1.6.1. Metros perforados por guardia

En los reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay, se registró un rendimiento promedio de avance comprendido entre 20 y 24 metros perforados por guardia, dependiendo de las condiciones geológicas y operacionales del sondaje.

En la Tabla 9 se presenta el registro de avance de perforación correspondiente a la segunda semana de febrero del 2025.

Tabla 9

Registro de avance de perforación diamantina – Segunda semana de febrero 2025

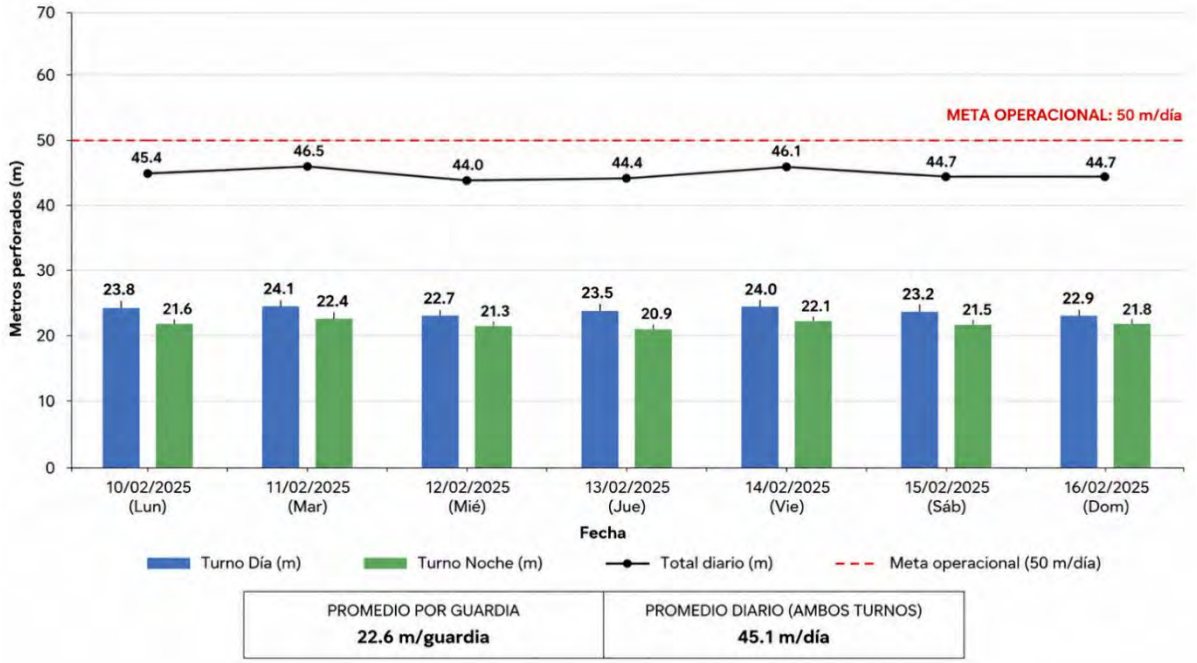
Fecha	Turno	Avance perforado (m)
10/02/2025	Día	23.8
	Noche	21.6
11/02/2025	Día	24.1
	Noche	22.4
12/02/2025	Día	22.7
	Noche	21.3
13/02/2025	Día	23.5
	Noche	20.9
14/02/2025	Día	24.0
	Noche	22.1
15/02/2025	Día	23.2
	Noche	21.5
16/02/2025	Día	22.9
	Noche	21.8
Metros por guardia		**22.6 m/guardia**

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina

Como se muestra en la Figura 12, el avance diario de perforación diamantina registrado durante la segunda semana de febrero del 2025 se mantuvo por debajo de la meta operacional establecida por la empresa correspondiente a 50 metros perforados por día. Asimismo, se observa un rendimiento promedio de 22.6 m/guardia y un avance diario promedio de 45.1 m/día considerando ambos turnos de operación.

Figura 12

Comparación del avance de perforación respecto a la meta operacional diaria febrero 2025



Nota: Elaboración propia

4.1.6.2. Metros perforados por hora (ROP)

El ROP (Rate of Penetration) representa el rendimiento efectivo de perforación durante la ejecución del sondaje diamantino. De acuerdo con los reportes operacionales del equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay, se registró un avance promedio de 22.6 metros por guardia. Considerando aproximadamente 7.5 horas efectivas de perforación por guardia, el rendimiento operacional promedio fue de 3.01 m/h.

Tabla 10

Rendimiento de perforación diamantina (ROP)

Parámetro	Valor
Avance promedio por guardia	22.6 m
Horas efectivas de perforación	7.5 h
ROP promedio	3.01 m/h

Nota: Elaboración propia

4.1.6.3. Recuperación de testigo (%)

La recuperación de testigo durante la perforación diamantina en Antapaccay presenta un rango operacional aproximado entre 80 % y 95 %, dependiendo de las condiciones geológicas, fracturamiento de la roca y estabilidad del sondaje.

En zonas con presencia de roca fracturada, pérdida de circulación y problemas operacionales durante la recuperación del núcleo, se registran menores porcentajes de recuperación debido a pérdida de testigo, lavado del núcleo y atascamiento del corel.

Tabla 11

Registro referencial de recuperación de testigo

Fecha	Recuperación (%)	Observación
10/02/2025	95	Recuperación alta
11/02/2025	93	Recuperación alta
12/02/2025	88	Recuperación moderada por fracturamiento
13/02/2025	76	Baja recuperación por pérdida parcial de testigo
14/02/2025	96	Recuperación alta
15/02/2025	74	Baja recuperación por atascamiento y lavado de núcleo
16/02/2025	91	Recuperación alta

Nota: Elaboración propia

Recuperación promedio: 87.0 %

4.1.6.4. Desviación del taladro

Al analizar la reportabilidad post perforación de los sondajes diamantinos ejecutados en el Tajo Sur de Antapaccay, se identificaron variaciones de inclinación y azimut respecto al diseño inicial del sondaje. Estas variaciones se relacionan principalmente con zonas fracturadas, inestabilidad de plataforma y condiciones geomecánicas del terreno durante la perforación.

Para el control operacional de los sondajes se consideró como referencia una inclinación inicial de -75° y un azimut de 144°. A partir de los registros post perforación se evaluó la variación de trayectoria del taladro en diferentes profundidades y días de perforación.

En la Tabla 12 se presenta el control de desviación de sondajes diamantinos correspondiente a la segunda semana de febrero del 2025.

Tabla 12

Control de desviación de sondajes diamantinos post perforación

Sondaje	Fecha de Registro	Operador Geodrill	Profundidad Final (m)	Inclinación Final (°)	Azimut Final (°)	Desviación (°)
TL-021	10/02/2025	Javier Huaracha	300	-76.2	143.5	1.2
TL-021	11/02/2025	Javier Huaracha	350	-76.8	142.7	1.8
TL-022	11/02/2025	Javier Huaracha	280	-77.1	142.1	2.1
TL-023	12/02/2025	Javier Huaracha	320	-77.6	141.5	2.6
TL-024	13/02/2025	Javier Huaracha	300	-78.0	140.9	3.1
TL-025	14/02/2025	Javier Huaracha	300	-78.4	139.8	3.5
TL-025	15/02/2025	Javier Huaracha	350	-78.7	139.2	3.8
TL-026	16/02/2025	Javier Huaracha	280	-77.0	142.4	2.0

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina.

4.1.7. Identificación de Problemas del Proceso

El análisis operacional del proceso de perforación diamantina ejecutado por la empresa Geodrill en la ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay permitió identificar diversas deficiencias técnicas y operativas que afectan directamente la productividad de los sondajes diamantinos. Estas problemáticas generan disminución del rendimiento de perforación, incremento de tiempos improductivos, pérdidas operacionales y aumento de costos durante la ejecución de los sondajes.

A partir de la evaluación de los indicadores de línea base, reportes operacionales y observaciones realizadas en campo, se identificaron problemas relacionados con la desviación de los taladros, baja recuperación de testigo, pérdida de circulación, atascamiento de sarta, variabilidad del rendimiento de perforación y elevado consumo de aditivos de perforación.

Tabla 13

Principales problemas identificados en el proceso de perforación diamantina

Problema identificado	Efecto operacional
Desviación del taladro	Pérdida de precisión del sondaje y variación de trayectoria.
Baja recuperación de testigo	Información geológica incompleta y pérdida de calidad del sondaje.
Atascamiento de sarta	Paralización de operaciones y tiempos improductivos.
Pérdida de circulación	Inestabilidad del taladro y mayor consumo de fluidos.
Desgaste prematuro de brocas y barras de perforación	Disminución del rendimiento de perforación, incremento de cambios de herramientas y mayores costos operacionales.
Deficiente evacuación de detritus	Acumulación de recortes en el fondo del taladro, menor eficiencia de perforación y mayor riesgo de atascamiento de la sarta.
Variabilidad del ROP	Disminución del rendimiento operativo.
Alto consumo de aditivos	Incremento del costo operacional por metro perforado.

Nota: Elaboración propia.

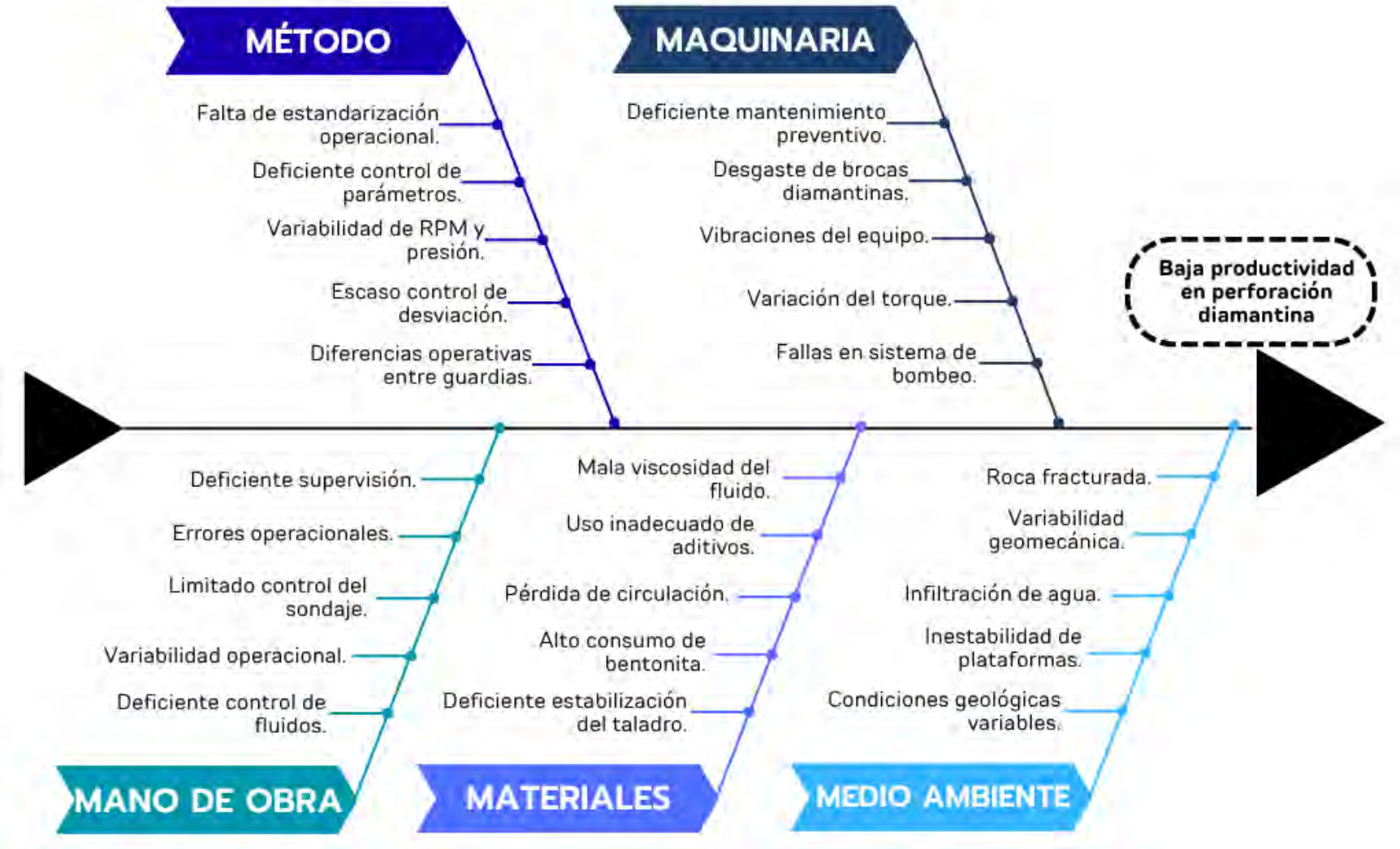
4.1.7.1. Análisis de causas técnicas y operativas

Con la finalidad de identificar las principales causas que afectan la productividad de la perforación diamantina en el Tajo Sur de Antapaccay, se utilizó el diagrama de Ishikawa o diagrama causa–efecto. Esta herramienta permitió analizar de manera estructurada las causas técnicas y operativas relacionadas con los problemas identificados durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

El análisis de Ishikawa consideró factores asociados al método de trabajo, maquinaria, mano de obra, materiales y medio ambiente, los cuales influyen directamente en el rendimiento de perforación, recuperación de testigo y estabilidad del taladro. En la Figura 13 se presenta el diagrama de Ishikawa aplicado al análisis de causas de baja productividad en la perforación diamantina ejecutada en el Tajo Sur de Antapaccay.

Figura 13

Diagrama de Ishikawa de las causas de baja productividad en perforación diamantina



Nota: Elaboración Propia

A partir del diagrama de Ishikawa, se identificaron las principales causas que afectan la productividad de la perforación diamantina en el Tajo Sur de Antapaccay. En base a ello, se plantea la aplicación del ciclo PHVA como metodología de mejora continua, iniciando con la etapa de planificación del proceso.

4.1.8. Costo unitario de perforación antes de la implementación

Con la finalidad de establecer la línea base económica del proceso de perforación diamantina, se realizó la estimación del costo unitario antes de la implementación de la metodología PHVA. Para ello, se consideraron los principales componentes del costo asociados a la ejecución de los sondajes, incluyendo mano de obra, máquina perforadora, materiales de perforación, aditivos de perforación, herramientas y otros materiales, así como implementos de seguridad. La consolidación de estos componentes permitió determinar el costo unitario inicial de perforación, el cual constituye la base para la evaluación económica de las mejoras implementadas.

Tabla 14

Resumen del costo unitario de perforación antes de la implementación

Concepto	Costo unitario (US$/m)
Mano de obra	8.30
Máquina perforadora	0.66
Materiales de perforación	7.16
Aditivos de perforación	13.43
Herramientas y otros materiales	0.06
Implementos de seguridad	0.12
Costo total	**29.73**

Nota: Elaboración propia a partir de la estimación de los costos unitarios correspondientes a la condición inicial de la perforación diamantina.

4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PHVA

4.2.1. Planificar

En esta etapa se definieron las acciones de mejora para optimizar el proceso de perforación diamantina en el Tajo Sur de Antapaccay, considerando los problemas identificados en la línea base operacional.

4.2.1.1. Definición de acciones de mejora operacional

Las acciones de mejora fueron planteadas para reducir desviaciones, mejorar el rendimiento de perforación, controlar el uso de aditivos y disminuir pérdidas operacionales durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

4.2.1.1.1. Plan de mantenimiento preventivo del equipo GEO 3000

Durante la evaluación de la línea base se identificaron deficiencias relacionadas con el estado mecánico y operativo del equipo GEO 3000, las cuales afectaban directamente la continuidad y rendimiento del proceso de perforación. Entre las principales falencias observadas se identificaron paradas no programadas, desgaste prematuro de componentes, variaciones en el sistema hidráulico y deficiencias en las inspecciones preoperacionales del equipo.

Asimismo, se evidenció que gran parte de las intervenciones mecánicas realizadas durante la operación correspondían a mantenimientos correctivos ejecutados después de la ocurrencia de fallas, generando tiempos improductivos, retrasos en la ejecución de los sondajes y disminución de los indicadores de productividad operacional. En la Tabla 15 se presentan las principales deficiencias identificadas durante la evaluación operacional del equipo GEO 3000.

Tabla 15

Falencias operacionales identificadas en el equipo GEO 3000 durante la evaluación de línea base

Falencias identificadas	Efecto operacional
Paradas mecánicas no programadas	Incremento de tiempos improductivos
Desgaste prematuro de brocas y accesorios	Disminución del rendimiento de perforación
Variación en presión hidráulica	Inestabilidad en parámetros de perforación
Inspecciones mecánicas no estandarizadas	Riesgo de fallas recurrentes
Mantenimiento correctivo frecuente	Baja disponibilidad operativa
Deficiente control de lubricación	Sobrecalentamiento y desgaste acelerado

Nota: Elaboración Propia

Frente a las deficiencias identificadas, se planteó la implementación de un plan de mantenimiento preventivo para el equipo GEO 3000, orientado a reducir fallas mecánicas recurrentes, mejorar la disponibilidad operativa y asegurar la continuidad de las perforaciones diamantinas.

El mantenimiento preventivo propuesto considera inspecciones periódicas de componentes mecánicos, revisión del sistema hidráulico, control de desgaste de herramientas de perforación y seguimiento técnico de las condiciones operativas del equipo, con la finalidad de estabilizar los parámetros de perforación y mejorar el desempeño operacional de los sondajes diamantinos.

4.2.1.1.2. Implementación del sistema TruCore para control de trayectoria

Durante la evaluación operacional de los sondajes diamantinos se identificaron desviaciones respecto a la trayectoria proyectada, asociadas principalmente a la falta de control continuo de orientación e inclinación durante la perforación. Estas variaciones afectaban la precisión del sondaje y la confiabilidad de la información geológica obtenida.

Frente a ello, se planteó la implementación del sistema TruCore de Boart Longyear, orientado al monitoreo y control de trayectoria durante la perforación diamantina. La aplicación de este sistema permite mejorar el control de desviaciones, verificar la orientación del sondaje en

tiempo real y reducir variaciones respecto al diseño programado, contribuyendo a una mayor precisión operacional y continuidad del proceso de perforación

Figura 14

Sistema TruCore para monitoreo y control de trayectoria en perforación diamantina.



Nota. Herramienta utilizada para la medición y verificación de la desviación del sondaje durante la perforación diamantina. Adaptado de Boart Longyear.

4.2.1.1.3. Estandarización de parámetros de perforación

Durante la evaluación de los sondajes diamantinos se identificó variabilidad en los parámetros operativos aplicados por los perforistas, principalmente en RPM, presión de avance y caudal de agua. Esta condición generaba diferencias en la velocidad de perforación, desgaste acelerado de herramientas y variaciones en la recuperación de testigo.

Como medida correctiva, se establecieron rangos operativos estandarizados para cada condición geológica identificada en el Tajo Sur. La estandarización permitió mantener un control uniforme de la perforación, reduciendo fluctuaciones operativas y mejorando la estabilidad del sondaje. Asimismo, el control continuo de los parámetros permitió disminuir tiempos

improductivos asociados a sobrepresión, vibración excesiva y atascamiento de herramientas durante la perforación diamantina.

4.2.1.1.4. Uso técnico de aditivos de perforación

Durante la evaluación de los sondajes diamantinos se identificó que la selección y aplicación de los aditivos de perforación se realizaba principalmente en función de la experiencia operativa del personal, generando variaciones en el uso de productos y en las cantidades empleadas según las condiciones del terreno. Esta situación ocasionaba consumos variables de aditivos, dificultades para estabilizar zonas fracturadas y mayores pérdidas de circulación durante la perforación. Asimismo, se observó la ausencia de criterios estandarizados que permitieran definir el aditivo más adecuado de acuerdo con las características geológicas y geomecánicas interceptadas durante el avance del sondaje. Como consecuencia, en determinadas condiciones operacionales se utilizaban productos que no respondían de manera eficiente a los problemas presentes en el taladro.

Frente a esta situación, se propuso establecer criterios técnicos y una cartilla de referencia para estandarizar la selección y uso de aditivos de perforación según las condiciones del terreno, optimizando el control de pérdidas de circulación, la estabilización del sondaje y el consumo de insumos.

4.2.1.1.5. Capacitación del personal operativo

Durante la evaluación operacional se identificaron diferencias en los procedimientos aplicados por los operadores durante la perforación diamantina, principalmente en control de parámetros, manipulación de herramientas y preparación de aditivos.

Como medida de mejora, se desarrollaron capacitaciones orientadas al uso adecuado del sistema TruCore, control de desviación, interpretación de parámetros operativos y procedimientos

estandarizados de perforación con el equipo GEO 3000. La capacitación permitió fortalecer los criterios técnicos del personal operativo, reducir errores en campo y mejorar la continuidad operacional durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

4.2.1.2. Metas operacionales de mejora

Las metas operacionales fueron definidas en función de los resultados obtenidos en la línea base de perforación diamantina y orientadas a mejorar la productividad, control operacional y eficiencia del proceso de perforación en el Tajo Sur de Antapaccay. Estas metas permitieron establecer valores objetivo para la evaluación de los indicadores de desempeño durante la implementación de las propuestas de mejora.

4.2.1.2.1. Incremento de metros perforados por guardia

Se planteó como meta operacional incrementar los metros perforados por guardia mediante la reducción de tiempos improductivos, la optimización de los parámetros de perforación y la mejora de la continuidad operacional del equipo GEO 3000. Considerando que durante la evaluación de la línea base el avance diario registrado se mantenía por debajo de la meta establecida por la empresa, se definió como objetivo alcanzar de manera sostenida un rendimiento de 50 m/día, lo que representaría un incremento esperado aproximado del 10 % al 12 % respecto a las condiciones operacionales iniciales y contribuiría a mejorar la productividad del proceso de perforación diamantina.

4.2.1.2.2. Mejora del ROP

Se estableció como objetivo mejorar el rendimiento de penetración (ROP) mediante la optimización de parámetros operativos y control técnico de perforación. La meta operacional consistió en incrementar el ROP promedio en un rango de 8% a 12% respecto a los valores registrados en la línea base de perforación diamantina.

4.2.1.2.3. Incremento de recuperación de testigo

Como meta operacional se planteó incrementar el porcentaje de recuperación de testigo mediante una mejor estabilización del sondaje y control de las condiciones de perforación. La meta definida fue mantener una recuperación de testigo superior al 90% en los sondajes diamantinos ejecutados en el Tajo Sur.

4.2.1.2.4. Reducción de desviación del sondaje

Se planteó reducir la desviación de los sondajes respecto a la trayectoria diseñada mediante la implementación del sistema TruCore y el control continuo de parámetros operativos. La meta operacional consistió en reducir la desviación promedio del sondaje en al menos un 15% respecto a los valores obtenidos durante la etapa de línea base.

4.2.1.2.5. Reducción del costo por metro perforado

Se estableció reducir el costo por metro perforado mediante la optimización de los recursos utilizados durante la perforación diamantina. Para ello, se planteó mejorar la vida útil de las brocas y accesorios de perforación mediante el control adecuado de los parámetros operacionales, así como optimizar el uso de aditivos en función de las condiciones geológicas del terreno. Asimismo, se buscó disminuir pérdidas operacionales asociadas a atascamientos, desviaciones, pérdida de circulación y tiempos improductivos, contribuyendo a una mayor eficiencia del proceso. La meta planteada consistió en reducir el costo por metro perforado entre un 5 % y 10 % respecto a la línea base operacional, permitiendo mejorar el desempeño económico del contrato y contribuir al cumplimiento de las metas operacionales establecidas por la Compañía Minera Antapaccay

4.2.2. Hacer

En esta etapa se ejecutaron las acciones operacionales propuestas para mejorar la productividad y el control del proceso de perforación diamantina. Las actividades implementadas

estuvieron orientadas a reducir tiempos improductivos, optimizar el rendimiento operacional del equipo GEO 3000 y mejorar la estabilidad de los sondajes durante la perforación. Asimismo, las mejoras aplicadas comprendieron actividades de mantenimiento preventivo, control operacional de perforación, monitoreo de trayectoria y fortalecimiento técnico del personal operativo.

4.2.2.1. Ejecución del mantenimiento preventivo

Como parte de la etapa de implementación, se ejecutó el mantenimiento preventivo del equipo GEO 3000 con la finalidad de reducir fallas operacionales, mejorar la disponibilidad mecánica y disminuir tiempos muertos durante la perforación diamantina.

Las actividades desarrolladas estuvieron orientadas al control de los componentes mecánicos, sistema hidráulico y herramientas de perforación, considerando inspecciones periódicas y controles programados según las horas de operación del equipo. Estas actividades se alinearon a criterios de mantenimiento preventivo programado cada 50, 250 y 1000 horas de trabajo, similares a los esquemas aplicados en perforadoras GEO 3000 en empresas perforistas. Asimismo, la ejecución del mantenimiento permitió mejorar la continuidad operacional del equipo y reducir intervenciones correctivas no programadas durante la perforación diamantina.

Figura 15

Actividades operacionales y mantenimiento preventivo – GEO 3000



Nota: Elaboración Propia

4.2.2.1.1. Inspección mecánica del equipo

Se realizaron inspecciones mecánicas programadas al equipo GEO 3000 para verificar el estado del cabezal de rotación, sistema de avance, abrazaderas, mangueras y conexiones mecánicas. Estas inspecciones permitieron identificar desgaste, fugas y fallas operacionales que afectaban la continuidad de la perforación.

Figura 16

Inspección mecánica de la perforadora diamantina GEO 3000



Nota. Evaluación mecánica del sistema de perforación y componentes estructurales del equipo GEO 3000 durante las actividades de mantenimiento preventivo en plataforma de perforación del Tajo Sur de Antapaccay. Elaboración propia.

4.2.2.1.2. Revisión del sistema hidráulico y bombeo

Se efectuó el control del sistema hidráulico y de bombeo mediante la revisión de presión de trabajo, bombas, válvulas, mangueras y niveles de aceite hidráulico. Asimismo, se verificó la circulación de fluidos de perforación para mantener la estabilidad y limpieza del sondaje.

4.2.2.1.3. Control de desgaste de brocas y accesorios

Se realizó el control periódico del desgaste de brocas diamantadas, escariadores y barras de perforación, permitiendo identificar pérdida de capacidad de corte y deterioro de herramientas. Esto permitió reducir sobreesfuerzos del equipo y mantener la estabilidad de los parámetros de perforación.

Figura 17

Control de desgaste de brocas diamantinas.



Nota. A la izquierda se observa una broca diamantina no operativa con desgaste avanzado, retirada del proceso de perforación debido a la pérdida de eficiencia operacional. A la derecha se muestra una broca operativa en condiciones adecuadas para continuar las actividades de perforación diamantina en el equipo GEO 3000. Elaboración propia.

4.2.2.2. Aplicación del sistema TruCore

Como parte de las acciones de mejora operacional, se implementó el sistema TruCore de Boart Longyear para el control de trayectoria durante la perforación diamantina. La aplicación de esta herramienta permitió mejorar el control de orientación e inclinación del sondaje, reduciendo desviaciones respecto al diseño programado.

La instalación del sistema TruCore se realizó mediante el acondicionamiento del tubo interior y la extensión del tubo exterior antes del ingreso de la tubería al pozo. Asimismo, durante la perforación se efectuó el monitoreo continuo de trayectoria para verificar el comportamiento del sondaje y aplicar correcciones operativas cuando se identificaban variaciones en la dirección proyectada.

La Figura 18 presenta la configuración e instalación inicial del sistema TruCore en el tubo interior de perforación.

Figura 18

Configuración inicial e instalación del sistema TruCore en el tubo interior

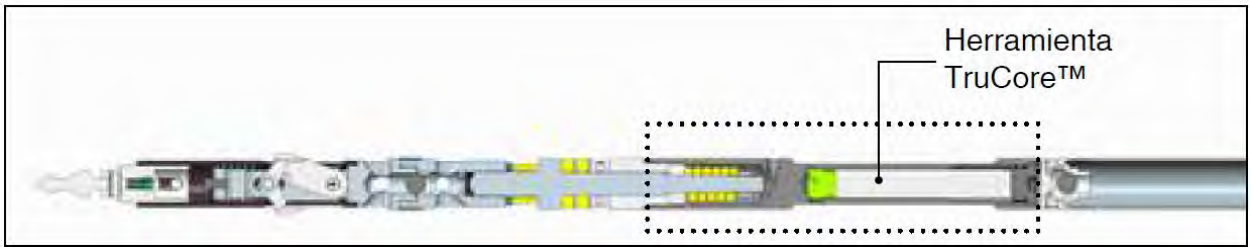


Nota: Adaptado de manual operativo TruCore – Boart Longyear.

La Figura 19 muestra la instalación de la extensión del tubo exterior y el acondicionamiento final de la herramienta TruCore antes del ingreso de la tubería al interior del sondaje.

Figura 19

Instalación de extensión del tubo exterior del sistema TruCore



Nota: Adaptado de manual operativo TruCore – Boart Longyear.

4.2.2.3. Aplicación de parámetros estandarizados

Como parte de las acciones de mejora implementadas, se establecieron parámetros operacionales estandarizados para la ejecución de los sondajes diamantinos con el equipo GEO 3000. La estandarización estuvo orientada a uniformizar los criterios de operación entre perforistas, definiendo rangos de referencia para la velocidad de rotación, peso sobre la broca y circulación del fluido de perforación, considerando los sistemas NQ y HQ utilizados durante la campaña de perforación.

Los parámetros fueron establecidos tomando como referencia recomendaciones técnicas para perforación diamantina y adaptados a las condiciones operacionales presentes en el Tajo Sur. Su aplicación permitió mejorar el control de la perforación, reducir la variabilidad operativa entre guardias y contribuir a una mayor estabilidad del sondaje, minimizando eventos asociados a vibraciones excesivas, desgaste prematuro de herramientas y desviaciones durante el avance. (Véase en la Tabla 16)

Tabla 16

Parámetros operacionales estandarizados - perforación diamantina con equipo GEO 3000

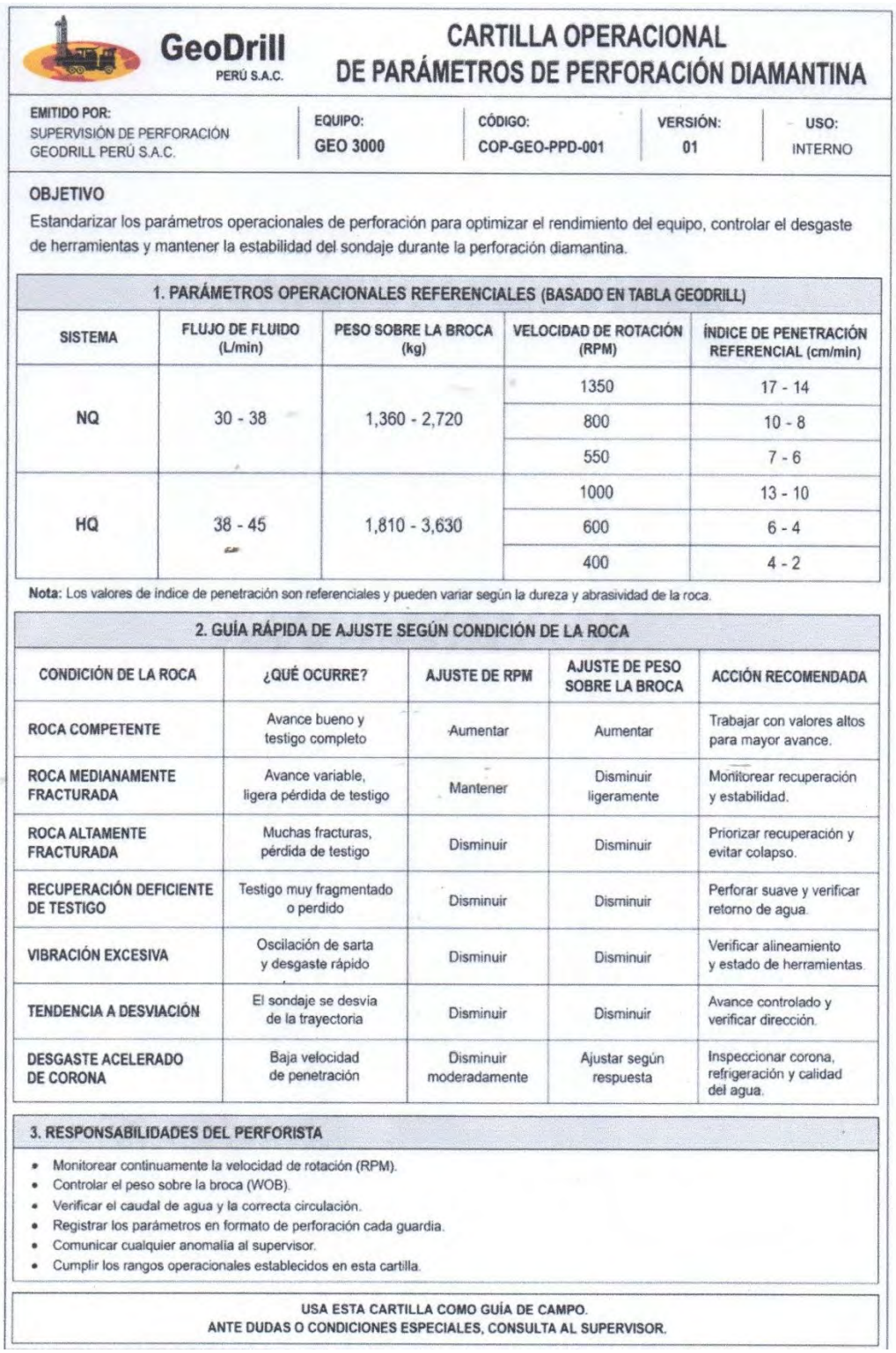
Parámetro operacional	Unidad	Sistema NQ	Sistema HQ
Flujo de fluido	L/min	30 – 38	38 – 45
Peso sobre la broca	lb	3000 – 6000	4000 – 8000
Velocidad de rotación	RPM	800 – 1350	600 – 1000
Índice de penetración referencial	cm/min	8 – 17	6 – 13

Nota: Elaboración propia. Los rangos operacionales fueron definidos a partir de las observaciones realizadas durante la ejecución de los sondajes diamantinos, considerando las condiciones geológicas interceptadas y el comportamiento operativo del equipo GEO 3000.

Con la finalidad de uniformizar los criterios operacionales durante la perforación diamantina, se elaboró una cartilla de campo para el equipo GEO 3000, la cual fue utilizada como guía de referencia por el personal operativo para el control de los principales parámetros de perforación y la toma de decisiones según las condiciones geológicas interceptadas durante el avance del sondaje.

Figura 20

Cartilla operacional de parámetros de perforación diamantina del equipo GEO 3000.



GeoDrill PERÚ S.A.C.

CARTILLA OPERACIONAL DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA

EMITIDO POR:	EQUIPO:	CÓDIGO:	VERSIÓN:	USO:
SUPERVISIÓN DE PERFORACIÓN GEODRILL PERÚ S.A.C.	GEO 3000	COP-GEO-PPD-001	01	INTERNO

OBJETIVO

Estandarizar los parámetros operacionales de perforación para optimizar el rendimiento del equipo, controlar el desgaste de herramientas y mantener la estabilidad del sondaje durante la perforación diamantina.

1. PARÁMETROS OPERACIONALES REFERENCIALES (BASADO EN TABLA GEODRILL)

SISTEMA	FLUJO DE FLUIDO (L/min)	PESO SOBRE LA BROCA (kg)	VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM)	ÍNDICE DE PENETRACIÓN REFERENCIAL (cm/min)
NQ	30 - 38	1,360 - 2,720	1350	17 - 14
			800	10 - 8
			550	7 - 6
HQ	38 - 45	1,810 - 3,630	1000	13 - 10
			600	6 - 4
			400	4 - 2

Nota: Los valores de índice de penetración son referenciales y pueden variar según la dureza y abrasividad de la roca.

2. GUÍA RÁPIDA DE AJUSTE SEGÚN CONDICIÓN DE LA ROCA

CONDICIÓN DE LA ROCA	¿QUÉ OCURRE?	AJUSTE DE RPM	AJUSTE DE PESO SOBRE LA BROCA	ACCIÓN RECOMENDADA
ROCA COMPETENTE	Avance bueno y testigo completo	Aumentar	Aumentar	Trabajar con valores altos para mayor avance.
ROCA MEDIANAMENTE FRACTURADA	Avance variable, ligera pérdida de testigo	Mantener	Disminuir ligeramente	Monitorear recuperación y estabilidad.
ROCA ALTAMENTE FRACTURADA	Muchas fracturas, pérdida de testigo	Disminuir	Disminuir	Priorizar recuperación y evitar colapso.
RECUPERACIÓN DEFICIENTE DE TESTIGO	Testigo muy fragmentado o perdido	Disminuir	Disminuir	Perforar suave y verificar retorno de agua.
VIBRACIÓN EXCESIVA	Oscilación de sarta y desgaste rápido	Disminuir	Disminuir	Verificar alineamiento y estado de herramientas.
TENDENCIA A DESVIACIÓN	El sondaje se desvía de la trayectoria	Disminuir	Disminuir	Avance controlado y verificar dirección.
DESGASTE ACELERADO DE CORONA	Baja velocidad de penetración	Disminuir moderadamente	Ajustar según respuesta	Inspeccionar corona, refrigeración y calidad del agua.

3. RESPONSABILIDADES DEL PERFORISTA

- Monitorear continuamente la velocidad de rotación (RPM).
- Controlar el peso sobre la broca (WOB).
- Verificar el caudal de agua y la correcta circulación.
- Registrar los parámetros en formato de perforación cada guardia.
- Comunicar cualquier anomalía al supervisor.
- Cumplir los rangos operacionales establecidos en esta cartilla.

USA ESTA CARTILLA COMO GUÍA DE CAMPO.
ANTE DUDAS O CONDICIONES ESPECIALES, CONSULTA AL SUPERVISOR.

Nota. Documento emitido por Geodrill Perú S.A.C.

4.2.2.3.1. Control de velocidad de rotación (RPM)

La velocidad de rotación fue ajustada según el sistema de perforación y las condiciones del terreno. Se utilizaron rangos de 550 a 1350 RPM para NQ y de 400 a 1000 RPM para HQ, reduciendo la velocidad en zonas fracturadas para minimizar vibraciones y preservar la estabilidad del sondaje.

4.2.2.3.2. Control del peso sobre la broca

El peso sobre la broca fue regulado dentro de los rangos operacionales establecidos para cada sistema de perforación. Su control permitió mantener una adecuada velocidad de penetración y reducir esfuerzos excesivos sobre la sarta y la corona diamantada.

4.2.2.3.3. Control del caudal de fluido

El caudal de fluido fue controlado entre 30 y 38 L/min para NQ y entre 38 y 45 L/min para HQ, garantizando la limpieza del pozo, la evacuación de detritos y la refrigeración de la corona durante la perforación.

4.2.2.4. Uso técnico de aditivos de perforación

Como parte de las acciones de mejora implementadas, se establecieron criterios para la selección y aplicación de aditivos de perforación en función de las condiciones geológicas identificadas durante la ejecución de los sondajes diamantinos. El objetivo fue optimizar el desempeño del fluido de perforación, mejorar la estabilidad del pozo, controlar pérdidas de circulación y reducir problemas operacionales asociados a fracturas, presencia de arcillas y desgaste de herramientas.

4.2.2.4.1. Selección de aditivos según condición del terreno

La selección de los aditivos fue realizada de acuerdo con las condiciones observadas durante la perforación. Para terrenos normales se emplearon bentonita, VIS y PAC para mejorar

las propiedades del fluido. En zonas fracturadas o con pérdidas de circulación se incorporaron PolyPlus y Black Hole para estabilizar el pozo y reducir pérdidas de fluido. Asimismo, en presencia de arcillas se utilizó Aus-Det para disminuir el embotamiento, mientras que Poly Lube fue empleado para reducir la fricción y el desgaste de las herramientas de perforación.

Tabla 17

Aditivos utilizados y su aplicación durante la perforación diamantina

Aditivo	Función principal
Bentonita	Estabilización del pozo y aumento de viscosidad
VIS	Incremento de viscosidad y limpieza del pozo
PAC	Control de filtración y pérdidas de circulación
PH Control	Regulación del pH del agua
Aus-Det	Control de arcillas y reducción de embotamiento
PolyPlus	Estabilización y control de pérdidas de circulación
Poly Lube	Reducción de fricción y desgaste
Black Hole	Estabilización de zonas fracturadas y control de pérdidas

Nota. Elaboración propia basada en los aditivos utilizados durante la perforación diamantina ejecutada por Geodrill Perú S.A.C.

La aplicación de estos aditivos fue realizada según las condiciones operacionales identificadas en cada sondaje, permitiendo adaptar las propiedades del fluido a los requerimientos específicos del terreno y mejorar la continuidad operacional de la perforación.

Como parte de la estandarización del uso de aditivos durante la perforación diamantina, se elaboró una cartilla de campo para orientar la selección y aplicación de los productos utilizados según las condiciones geológicas y operacionales observadas durante la ejecución de los sondajes.

Figura 21

Cartilla operacional para el uso de aditivos en perforación diamantina del equipo GEO 3000



GeoDrill PERÚ S.A.C.

CARTILLA OPERACIONAL
USO DE ADITIVOS EN PERFORACIÓN DIAMANTINA

EMITIDO POR:	EQUIPO:	CÓDIGO:	VERSIÓN:	USO:
SUPERVISIÓN DE PERFORACIÓN GEODRILL PERÚ S.A.C.	GEO 3000	COP-GEO-PPD-001	01	INTERNO

OBJETIVO

Estandarizar el uso de aditivos para mejorar la estabilidad del pozo, la recuperación de testigo y el rendimiento del equipo.

1. ADITIVOS UTILIZADOS

Supervis VIS XL	Bentonita	PH Control	PAC	Aus-Det	PolyPlus	Poly Lube	Black Hole
Viscosificador	Arcilla base	Regulador de pH	Controla filtrado	Detergente / dispersante	Estabilizador / encapsulador	Lubricante	Sellador de pérdidas

2. FUNCIÓN DE CADA ADITIVO

ADITIVO	FUNCIÓN PRINCIPAL
Bentonita	Forma el lodo base y aumenta la viscosidad.
Supervis VIS XL	Incrementa viscosidad y capacidad de transporte.
PH Control	Ajusta y regula el pH del agua de mezcla.
PAC	Controla la filtración de agua hacia la formación.
Aus-Det	Limpia la corona y dispersa los finos.
PolyPlus	Estabiliza formaciones y encapsula arcillas.
Poly Lube	Reduce fricción, torque y desgaste.
Black Hole	Sella fracturas y recupera el retorno del fluido.

3. GUÍA RÁPIDA SEGÚN CONDICIÓN DE LA ROCA

CONDICIÓN DE LA ROCA	PROBLEMA	ADITIVOS RECOMENDADOS	OBJETIVO
Roca competente	Limpieza normal	Bentonita + PAC	Mantener circulación eficiente
Roca medianamente fracturada	Inestabilidad moderada	Bentonita + PAC + PolyPlus	Mejorar estabilidad
Roca altamente fracturada	Pérdidas y derrumbes	Bentonita + PAC + PolyPlus + Black Hole	Estabilizar y sellar fracturas
Pérdida parcial de circulación	Disminución del retorno	PAC + Black Hole	Reducir filtración y sellar
Pérdida total de circulación	Sin retorno	Black Hole	Recuperar circulación
Presencia de arcillas	Hinchamiento	PH Control + PAC + PolyPlus	Encapsular y estabilizar
Embotamiento de corona	Baja penetración	Aus-Det	Limpiar corona
Alto torque	Fricción elevada	Poly Lube	Reducir torque
Baja recuperación de testigo	Testigo fragmentado	PAC + PolyPlus	Mejorar recuperación

4. MEZCLAS RECOMENDADAS EN CAMPO

ESCENARIO	MEZCLA RECOMENDADA	RESULTADO ESPERADO
Perforación normal	Agua + Bentonita + PAC	Lodo estable y buena limpieza
Terreno fracturado	Agua + Bentonita + PAC + PolyPlus	Mayor estabilidad del pozo
Arcillas o corona embotada	Agua + Bentonita + PAC + Aus-Det	Corona limpia y mayor penetración
Alto torque	Agua + Bentonita + PAC + Poly Lube	Menor fricción y desgaste
Pérdidas de circulación	Agua + Bentonita + PAC + PolyPlus + Black Hole	Sellado de fracturas y recuperación del retorno

5. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DEL FLUIDO

1. Preparar agua limpia en el tanque de mezcla.
2. Ajustar pH con PH Control (8.5 – 10.5).
3. Incorporar Benttonita lentamente con agitación.
4. Agregar Supervis VIS XL si se requiere más viscosidad.
5. Incorporar PAC y PolyPlus según condición de la roca.
6. Agregar Aus-Det o Poly Lube según necesidad.
7. Incorporar Black Hole únicamente si hay pérdida de circulación.
8. Verificar viscosidad, retorno y comportamiento del lodo.

6. RESPONSABILIDADES DEL PERFORISTA

- Monitorear continuamente velocidad de rotación (RPM) y peso sobre la broca.
- Controlar el retorno de fluido y la calidad del lodo.
- Registrar los parámetros de perforación cada guardia.
- Comunicar de inmediato cualquier anomalía al supervisor.
- Cumplir los rangos operacionales establecidos en esta cartilla.

IMPORTANTE: Usar esta cartilla como guía de campo. Ante dudas o condiciones especiales, consultar al supervisor de perforación.

Nota: Documento emitido por la Supervisión de Perforación de Geodrill Perú S.A.C.

4.2.2.5. Capacitación del personal que labora en GEODRILL

Como parte de la implementación del ciclo PHVA, se realizaron capacitaciones operativas al personal involucrado en las actividades de perforación diamantina, orientadas a estandarizar criterios operacionales durante la ejecución de los sondajes con el equipo GEO 3000.

Las capacitaciones estuvieron enfocadas en el control operacional de perforación, preparación de fluidos, mantenimiento preventivo y seguimiento de parámetros operacionales durante la perforación diamantina.

La Figura 22 presenta la capacitación operativa desarrollada al personal de perforación durante la implementación de mejoras operacionales.

Figura 22

Capacitación operativa al personal de perforación diamantina



Nota: Capacitación desarrollada durante la implementación del ciclo PHVA.

4.2.3. Verificar

En esta etapa se evaluaron los resultados obtenidos después de la implementación de las acciones de mejora propuestas mediante el ciclo PHVA en las operaciones de perforación diamantina del Tajo Sur de Antapaccay. La verificación permitió analizar el comportamiento de los indicadores operacionales y validar el efecto de las mejoras aplicadas sobre la productividad del proceso.

4.2.3.1. Resultados técnicos obtenidos

Los resultados técnicos obtenidos fueron evaluados mediante indicadores de rendimiento aplicados durante la ejecución de los sondajes diamantinos posteriores a la implementación del ciclo PHVA. En esta etapa se analizó el comportamiento de los metros perforados por guardia, ROP, recuperación de testigo y desviación del sondaje, con la finalidad de verificar la mejora del desempeño operacional del equipo GEO 3000.

4.2.3.1.1. Metros perforados por guardia

Los metros perforados por guardia fueron evaluados como indicador principal de productividad operacional durante la implementación de las mejoras propuestas mediante el ciclo PHVA. Para ello, se realizó el seguimiento del avance de perforación registrado por guardia durante las operaciones ejecutadas con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

En la Tabla 18 se presenta el reporte operacional de avance perforado por guardia correspondiente al mes de marzo del 2025, periodo en el cual se desarrolló la etapa inicial de implementación y estabilización de las mejoras operacionales aplicadas al proceso de perforación diamantina.

Tabla 18

Reporte operacional de avance de perforación diamantina por guardia – Marzo 2025

Fecha	Turno	Sondaje	Avance por guardia (m)	Observación operacional
02/03/2025	Día	TS-048	21.8	Ajuste inicial de parámetros operativos
	Noche	TS-048	20.9	Variación en circulación de fluido
04/03/2025	Día	TS-049	23.4	Mejora parcial del rendimiento
	Noche	TS-049	18.6	Limpieza parcial del pozo
06/03/2025	Día	TS-050	24.1	Mejor control de RPM
	Noche	TS-050	22.8	Continuidad operacional moderada
09/03/2025	Día	TS-051	23.7	Estabilidad parcial del sondaje
	Noche	TS-051	17.9	Zona fracturada e inestabilidad
11/03/2025	Día	TS-052	22.6	Variación de torque
	Noche	TS-052	23.1	Recuperación parcial del avance
14/03/2025	Día	TS-053	24.5	Mejor comportamiento del fluido
	Noche	TS-053	23.8	Reducción de tiempos improductivos
17/03/2025	Día	TS-054	24.8	Mayor estabilidad operacional
	Noche	TS-054	23.9	Continuidad operacional estable
20/03/2025	Día	TS-055	18.7	Vibración y limpieza del taladro
	Noche	TS-055	22.4	Recuperación progresiva
24/03/2025	Día	TS-056	25.3	Mejor control operacional
	Noche	TS-056	24.6	Mayor estabilidad del proceso
27/03/2025	Día	TS-057	25.4	Incremento progresivo del avance
	Noche	TS-057	24.8	Mejor continuidad operacional

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Durante el primer mes de implementación del ciclo PHVA se registró variabilidad operativa en los metros perforados por guardia debido al proceso de estabilización de parámetros operacionales, control de fluidos y adaptación de las actividades de mantenimiento preventivo aplicadas al equipo GEO 3000.

Asimismo, en algunas guardias se presentaron disminuciones del rendimiento operacional asociadas a zonas fracturadas, limpieza del taladro, vibración de la sarta y variaciones en la circulación del fluido de perforación. Sin embargo, conforme avanzó la implementación de las mejoras operacionales, se evidenció una recuperación progresiva del avance perforado, registrándose guardias con rendimientos superiores a la línea base operacional inicialmente evaluada.

En la Tabla 19 se presenta el reporte operacional de avance perforado por guardia correspondiente al mes de abril del 2025, periodo en el cual las mejoras implementadas mediante el ciclo PHVA mostraron un comportamiento operacional más estable durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

Tabla 19

Reporte operacional de avance de perforación diamantina por guardia – Abril 2025

Fecha	Turno	Sondaje	Avance por guardia (m)	Observación operacional
02/04/2025	Día	TS-058	23.8	Estabilidad inicial de parámetros
	Noche	TS-058	24.1	Mejor continuidad operacional
04/04/2025	Día	TS-059	24.5	Control estable de fluido
	Noche	TS-059	23.9	Menor tiempo improductivo
07/04/2025	Día	TS-060	25.2	Mejor comportamiento del torque
	Noche	TS-060	24.7	Estabilidad del sondaje
10/04/2025	Día	TS-061	26.1	Mayor continuidad de perforación
	Noche	TS-061	25.4	Control operacional uniforme
13/04/2025	Día	TS-062	24.8	Mejor rendimiento operacional
	Noche	TS-062	23.7	Estabilidad moderada del avance
16/04/2025	Día	TS-063	26.5	Máximo rendimiento registrado
	Noche	TS-063	25.8	Reducción de paralizaciones
20/04/2025	Día	TS-064	24.9	Control estable de parámetros
	Noche	TS-064	24.4	Continuidad operacional
24/04/2025	Día	TS-065	25.7	Mejor estabilidad del proceso
	Noche	TS-065	24.8	Mejor control del sondaje
28/04/2025	Día	TS-066	26.2	Incremento sostenido del avance
	Noche	TS-066	25.5	Mayor eficiencia operacional

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Durante abril del 2025 se evidenció una mayor estabilidad operacional en los metros perforados por guardia respecto al periodo inicial de implementación del ciclo PHVA. Los avances

registrados se mantuvieron de manera sostenida por encima de 23.5 m/guardia, reflejando una mejora en la continuidad operacional y control de los parámetros de perforación.

Asimismo, se alcanzaron picos operacionales de hasta 26.5 m/guardia durante algunas jornadas de perforación, asociados a una mejor estabilización del sondaje, reducción de tiempos improductivos y mayor control técnico del proceso de perforación diamantina ejecutado con el equipo GEO 3000.

En la Tabla 20 se presenta el análisis comparativo del promedio diario de avance perforado registrado entre enero y junio del 2025 durante la implementación progresiva del ciclo PHVA en las operaciones de perforación diamantina ejecutadas con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Tabla 20

Análisis comparativo del promedio diario de avance perforado – Enero a junio 2025

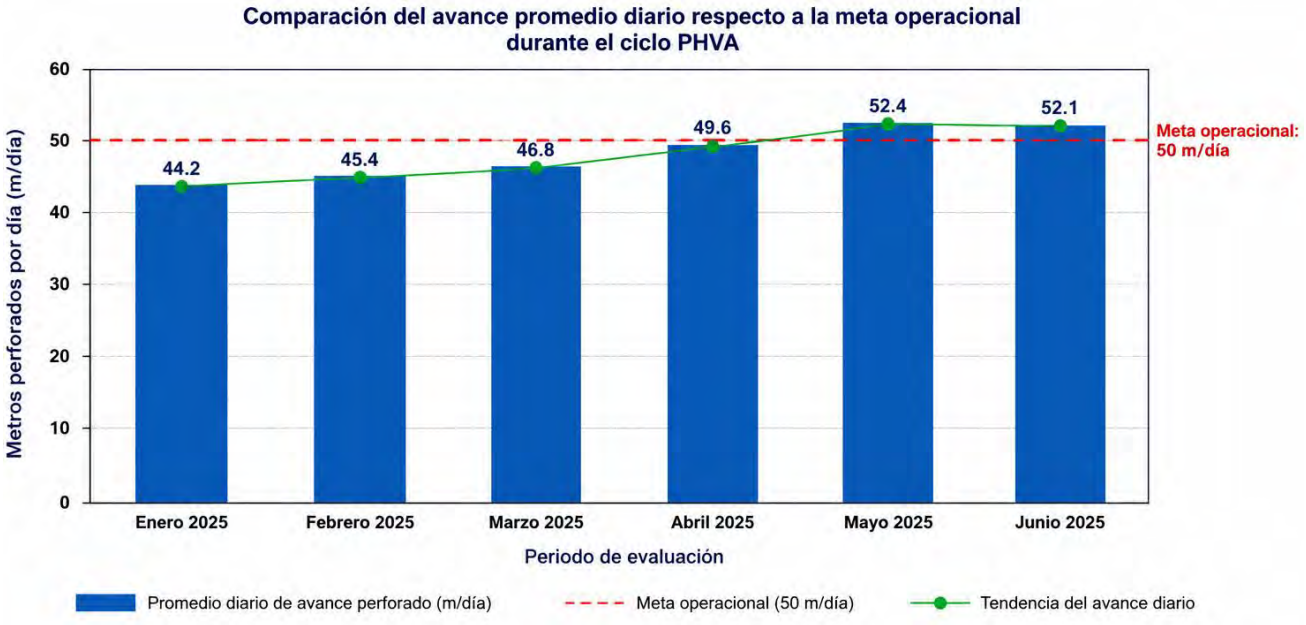
Mes	Promedio diario de avance perforado (m/día)	Condición operacional predominante
Enero 2025	44.2	Línea base operacional con variabilidad y tiempos improductivos
Febrero 2025	45.4	Inicio de implementación del ciclo PHVA
Marzo 2025	46.8	Mejora progresiva y estabilización parcial de parámetros
Abril 2025	49.6	Mayor estabilidad operacional y continuidad de perforación
Mayo 2025	52.4	Rendimiento operacional estabilizado y control continuo del proceso
Junio 2025	52.1	Continuidad operacional sostenida y reducción de pérdidas operacionales

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Los resultados evidenciaron una mejora progresiva en el avance diario de perforación conforme avanzó la implementación de las acciones de mejora operacional. Durante enero y febrero aún se presentaban variaciones operacionales y tiempos improductivos asociados al proceso inicial de estabilización; sin embargo, a partir de marzo se observó una recuperación gradual del rendimiento de perforación, alcanzándose durante abril, mayo y junio un comportamiento operacional más estable, con mayores avances diarios y mejor continuidad operacional del proceso de perforación diamantina.

Figura 23

Avance promedio por guardia respecto a la meta operacional durante el ciclo PHVA



Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

La Figura 23 muestra el incremento progresivo del promedio diario de metros perforados durante la implementación del ciclo PHVA, pasando de 44.2 m/día en enero a 52.4 m/día en mayo. Asimismo, durante abril se registró un promedio de 49.6 m/día, evidenciándose una mejora gradual

del rendimiento operacional y alcanzándose durante mayo valores superiores a la meta operacional establecida de 50 m/día para las operaciones de perforación diamantina.

4.2.3.1.2. ROP obtenido

El ROP fue evaluado como indicador de rendimiento de perforación durante la implementación del ciclo PHVA, considerando únicamente las horas efectivas de perforación ejecutadas durante cada guardia operacional.

En la Tabla 21 se presenta el análisis comparativo del ROP promedio registrado entre enero y junio del 2025 durante la implementación progresiva del ciclo PHVA en las operaciones de perforación diamantina ejecutadas con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Tabla 21

Análisis comparativo del ROP promedio – Enero a junio 2025

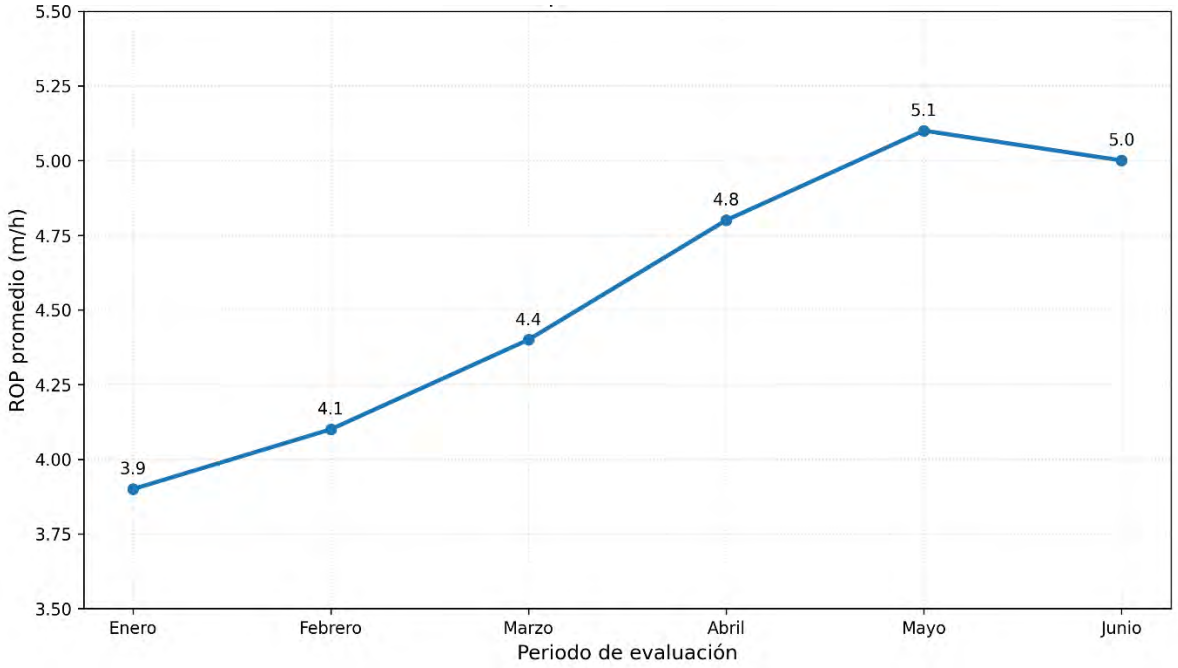
Mes	ROP promedio (m/h)	Condición operacional predominante
Enero 2025	3.9	Variabilidad operacional y tiempos improductivos
Febrero 2025	4.1	Inicio de estabilización de parámetros
Marzo 2025	4.4	Mejora progresiva del rendimiento
Abril 2025	4.8	Mayor continuidad operacional
Mayo 2025	5.1	Rendimiento operacional estabilizado
Junio 2025	5.0	Control sostenido del proceso operativo

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Los resultados evidenciaron una mejora progresiva del ROP durante la implementación del ciclo PHVA. A partir de marzo se observó un incremento gradual de la velocidad efectiva de perforación, alcanzándose durante mayo y junio valores cercanos y superiores a 5.0 m/h.

Figura 24

Evolución del ROP promedio durante el ciclo PHVA



Nota: Elaboración propia

La Figura 24 muestra la evolución progresiva del ROP promedio durante la implementación del ciclo PHVA, incrementándose de 3.9 m/h en enero a 5.0 m/h en junio. Asimismo, durante mayo se registró el mayor rendimiento operacional con un ROP promedio de 5.1 m/h.

4.2.3.1.3. Recuperación de testigo

La recuperación de testigo presentó una mejora progresiva durante la implementación del ciclo PHVA debido al mejor control de los parámetros operacionales de perforación, estabilización del sondaje y control del fluido de perforación. Asimismo, la aplicación adecuada de presión de avance, RPM y circulación de fluido permitió reducir pérdidas de testigo y mejorar la continuidad de recuperación durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

Figura 25

Recuperación de testigos diamantinos en cajas portatestigos – 16 de mayo de 2025



Nota: Registro durante las operaciones de perforación diamantina con el equipo GEO 3000.

La Figura 25 muestra la disposición y recuperación de testigos diamantinos obtenidos durante las operaciones de perforación ejecutadas el 16 de mayo del 2025, evidenciándose una adecuada continuidad y conservación del testigo recuperado.

4.2.3.1.4. Desviación del sondaje

La desviación del sondaje fue evaluada como indicador de control operacional durante la implementación del ciclo PHVA, debido a que permite verificar la estabilidad de la trayectoria de perforación respecto al diseño inicial del sondaje. Asimismo, este indicador se relaciona

directamente con el control de parámetros operacionales, estabilidad del macizo rocoso y aplicación del sistema TruCore durante la perforación diamantina.

En la Tabla 22 se presenta el control de desviación de sondajes diamantinos correspondiente al proceso de verificación operacional desarrollado durante mayo del 2025.

Tabla 22

Control de desviación de sondajes diamantinos post perforación – Mayo 2025

Sondaje	Fecha de Registro	Operador Geodrill	Profundidad Final (m)	Inclinación Final (°)	Azimut Final (°)	Desviación (°)
TL-061	06/05/2025	Luis Quispe	320	-76.4	143.2	1.4
TL-062	07/05/2025	Marco Huamán	350	-76.8	142.7	1.6
TL-063	08/05/2025	Kevin Sucapuca	300	-77.0	142.1	1.5
TL-064	10/05/2025	Luis Quispe	340	-77.3	141.8	1.3
TL-065	12/05/2025	Marco Huamán	360	-77.5	141.3	1.2
TL-066	14/05/2025	Kevin Sucapuca	300	-77.1	141.9	1.4
TL-067	16/05/2025	Luis Quispe	350	-76.9	142.4	1.1
TL-068	18/05/2025	Marco Huamán	320	-76.7	142.8	1.3

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina ejecutados con el equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

Los resultados evidenciaron una reducción de la desviación del sondaje respecto a la línea base operacional inicialmente evaluada. Durante mayo del 2025 se registraron desviaciones cercanas y menores a 1.5°, asociadas al mejor control de trayectoria, estabilización de parámetros operacionales y aplicación del sistema TruCore durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

4.2.3.2. Resultados operacionales del proceso

4.2.3.2.1. Reducción de tiempos improductivos

Los tiempos improductivos fueron evaluados durante la implementación del ciclo PHVA con la finalidad de verificar la continuidad operacional del proceso de perforación diamantina y la reducción de paralizaciones durante la ejecución de los sondajes.

Tabla 23

Reducción de tiempos improductivos durante la implementación del ciclo PHVA

Actividad improductiva	Enero 2025 (h/día)	Junio 2025 (h/día)	Reducción (%)
Limpieza y estabilización del taladro	1.8	1.1	38.9
Atascamiento de testigo	1.5	0.7	53.3
Paralizaciones mecánicas menores	1.4	0.6	57.1
Variación de circulación de fluido	0.9	0.5	44.4
Corrección de desviación del sondaje	0.6	0.3	50.0
Tiempo improductivo total	6.2	3.2	48.4

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operacionales de perforación diamantina.

Los resultados evidenciaron una reducción progresiva de los tiempos improductivos durante la implementación del ciclo PHVA. Las mayores reducciones se registraron en actividades relacionadas con atascamiento de testigo, paralizaciones mecánicas menores y estabilización del taladro, debido a la aplicación del mantenimiento preventivo, control de parámetros operacionales y mejora del sistema de circulación de fluido durante la perforación diamantina ejecutada con el equipo GEO 3000.

4.2.3.2.2. Conservación de la vida útil de brocas y herramientas de perforación

Los registros operacionales evidenciaron una tendencia creciente en la vida útil promedio de las brocas durante el periodo de evaluación. Entre enero y abril se registraron valores entre 228 m y 232 m por broca, mientras que a partir de la implementación de las mejoras operacionales se

observó un incremento progresivo, alcanzando 256 m por broca en julio. Este comportamiento refleja una reducción del desgaste prematuro de las herramientas de corte, asociada al control de los parámetros de perforación y al uso adecuado de aditivos según las condiciones geológicas interceptadas. (Véase en la Tabla 24)

Tabla 24

Evolución de la vida útil promedio de las brocas durante el periodo de evaluación

Mes	Vida útil promedio por broca (m)
Enero	228
Febrero	229
Marzo	231
Abril	232
Mayo	240
Junio	248
Julio	256
Promedio	**237.7 m**

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales de perforación diamantina.

4.2.4. Actuar

En esta etapa se establecieron acciones correctivas y de control continuo a partir de los resultados obtenidos durante la verificación operacional del ciclo PHVA, con la finalidad de mantener la estabilidad del proceso de perforación diamantina y asegurar la mejora continua de los indicadores operacionales del equipo GEO 3000 en el Tajo Sur de Antapaccay.

4.2.4.1. Acciones correctivas posteriores a la verificación

Las acciones correctivas posteriores a la verificación fueron orientadas al control continuo de los parámetros operacionales, reducción de desviaciones del proceso y mantenimiento de la continuidad operacional durante la ejecución de los sondajes diamantinos

4.2.4.1.1. Ajuste de parámetros de perforación

Como resultado de la etapa de verificación, se consolidaron los parámetros operacionales que presentaron un mejor desempeño durante la ejecución de los sondajes diamantinos. Estos parámetros fueron incorporados como referencia para futuras campañas de perforación, con la finalidad de mantener la estabilidad del sondaje, optimizar el rendimiento de las herramientas de perforación y reducir la variabilidad operativa entre guardias de trabajo.

Tabla 25

Parámetros operacionales estandarizados para futuras campañas de perforación diamantina

Condición geológica	RPM recomendados	Peso sobre la broca (kg)	Caudal de fluido (L/min)	Objetivo operacional
Roca competente	850 – 1350	1800 – 2700	30 – 38	Maximizar la velocidad de penetración
Roca medianamente fracturada	700 – 900	1600 – 2400	35 – 42	Mantener la estabilidad del sondaje
Roca altamente fracturada	550 – 750	1400 – 2000	40 – 45	Reducir vibraciones y desviación
Presencia de agua	500 – 700	1400 – 1900	42 – 45	Mejorar la limpieza del pozo
Pérdida de circulación	500 – 650	1300 – 1800	Flujo controlado	Preservar la estabilidad del taladro

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos durante la implementación y verificación de las mejoras operacionales en la perforación diamantina.

4.2.4.1.2. Mejora del programa de mantenimiento

Posterior a la etapa de verificación, se estableció la mejora continua del programa de mantenimiento preventivo con la finalidad de reducir paralizaciones mecánicas, mantener la continuidad operacional del equipo y asegurar la estabilidad del proceso de perforación diamantina.

Asimismo, se consolidó un control periódico de mantenimiento preventivo basado en horas de operación, considerando actividades de limpieza e inspección, cambio de aceite, lubricación y mantenimiento preventivo programado del equipo de perforación.

La Figura 26 muestra el control de mantenimiento preventivo realizado durante la operación del equipo de perforación, evidenciándose la ejecución periódica de actividades de inspección, lubricación y mantenimiento programado en función del horómetro operacional del equipo. Asimismo, la aplicación continua del programa de mantenimiento permitió reducir paralizaciones mecánicas y mejorar la continuidad operacional durante la perforación diamantina.

Figura 26

Registro de mantenimiento preventivo del equipo de perforación – Abril 2025

REGISTRO MANTENIMIENTO PREVENTIVO 2025

GeoDrill

UNIDAD: Maquina E -4455

N°	FECHA	HORÓMETRO/KILOMETRAJE	MECÁNICO	CA	LE	LI	MP	OBSERVACIONES
1	24/02/2025	4570 H	Jesus Lauge				X	50 horas
2	28/02/2025	4620 H	Jesus Lauge		X	X	X	50 horas
3	28/02/2025	4610 H	Jesus Lauge				X	50 horas
4	3/03/2025	4720 H	Jesus Lauge				X	50 horas
5	01/03/2025	4770 H	Jesus Lauge	X	X	X	X	Cada 50, 250 h
6	3/03/2025	4820 h	A. Ramos				X	50 horas
7	05/03/2025	4810 h	A. Ramos		X	X	X	50 hores
8	07/03/2025	4920 h	A. Ramos				X	50 hores
9	09/03/2025	4990 h	A. Ramos				X	50 horas
10	11/03/2025	5020 h	A. Ramos	X	X	X	X	Cada 50, 250 h
11	13/03/2025	5070 h	A. Ramos				X	50 horas
12	15/03/2025	5670 h	A. Ramos		X	X	X	50 horas
13	18/09/2025	5870 h	A. Ramos				X	50 horas
14	20/03/2025	5220 h	A. Ramos				X	50 horas
15	22/03/2025	5310 h	A. Ramos	X	X	X	X	Cada 50, 250 h
16	24/03/2025	5320 h	A. Ramos				X	50 horas
17	26/03/2025	5310 h	A. Ramos		X	X	X	50 horas
18	28/03/2025	5420 h	A. Ramos				X	50 horas
19	30/03/2025	5470 h	A. Ramos				X	50 horas
20	2/04/2025	5520 h	A. Ramos	X	X	X	X	Cada 50, 250, 1000 h
21	04/04/2025	5550 h	A. Ramos				X	50 horas
22	06/04/2025	5620 h	A. Ramos		X	X	X	50 horas
23	09/04/2025	5670 h	A. Ramos				X	50 horas
24	10/04/2025	5720 h	A. Ramos				X	50 horas
25	12/04/2025	5770 h	A. Ramos	X	X	X	X	Cada 50, 250 h
26	14/04/2025	5820 h	A. Ramos				X	50 horas
27	17/04/2025	5820 h	A. Ramos		X	X	X	50 horas
28	19/04/2025	5920 h	Wilfredo Vargas				X	50 horas cumplidas
29	21/04/2025	5970 h	Wilfredo Vargas				X	50 horas cumplidas
30	22/04/2025	6020 H	Wilfredo Vargas	X	X	X	X	50 horas cumplidas

CA	LIMPIEZA E INSPECCIÓN
LE	CAMBIO DE ACEITE
LI	LUBRICACIÓN Y ENGRASE
MP	MANTENIMIENTO PREVENTIVO

R.

Nota: Registro operacional de mantenimiento preventivo.

Tabla 26

Programa de mantenimiento preventivo y correctivo del equipo de perforación diamantina

Tipo de mantenimiento	Frecuencia	Actividades principales	Responsable	Objetivo
Preventivo diario	Inicio de cada turno	Inspección visual general, limpieza del equipo, verificación de fugas, revisión de niveles de aceite, lubricación de puntos críticos y registro de novedades.	Operador / Mecánico	Detectar anomalías tempranas y asegurar condiciones seguras de operación.
Preventivo de 50 horas	Cada 50 horas de operación	Limpieza e inspección general, lubricación y engrase de componentes móviles, revisión de pernos, mangueras y conexiones hidráulicas.	Mecánico	Reducir el desgaste de componentes y prevenir fallas menores.
Preventivo de 250 horas	Cada 250 horas de operación	Cambio de aceite y filtros, revisión del sistema hidráulico, ajuste de componentes mecánicos y verificación del sistema de rotación.	Mecánico de mantenimiento	Mantener el correcto funcionamiento de los sistemas principales del equipo.
Preventivo de 1000 horas	Cada 1000 horas de operación	Inspección integral del sistema hidráulico, revisión de bombas, motores hidráulicos, sistema de refrigeración y componentes estructurales.	Supervisor de mantenimiento	Prevenir fallas mayores y prolongar la vida útil del equipo.
Preventivo mayor	Cada 2000 horas de operación	Mantenimiento general del equipo, alineamiento, revisión estructural, limpieza del tanque hidráulico y reemplazo de componentes de desgaste crítico.	Supervisor de mantenimiento	Restablecer las condiciones óptimas de operación del equipo.
Correctivo	Cuando se presenta una falla	Diagnóstico de la avería, reparación o sustitución de componentes dañados, pruebas de funcionamiento y registro de la intervención realizada.	Mecánico de mantenimiento	Restablecer la operatividad del equipo en el menor tiempo posible y minimizar el tiempo de inactividad.

Nota: Elaboración propia con base en el programa de mantenimiento

4.2.4.1.3. Estandarización del uso de aditivos de perforación

Posterior a la etapa de verificación, se consolidaron los criterios para la selección y aplicación de aditivos de perforación según las condiciones geológicas y operacionales identificadas durante la ejecución de los sondajes diamantinos. Durante la etapa de diagnóstico se evidenciaron variaciones en el uso de aditivos debido a la ausencia de criterios estandarizados para su aplicación, generando diferencias en el comportamiento del fluido de perforación y en la estabilidad del sondaje.

Como acción de mejora, se estableció una guía de referencia para la utilización de bentonita, VIS, PAC, Aus-Det, PolyPlus, Poly Lube y Black Hole, en función de las condiciones observadas en campo. Esta estandarización permitió uniformizar la toma de decisiones durante la perforación, optimizar el desempeño del fluido de perforación y contribuir a la estabilidad del pozo, el control de pérdidas de circulación y la continuidad operacional de futuras campañas de perforación diamantina.

4.2.4.2. Estandarización del proceso mejorado

Posterior a la implementación y verificación de las acciones de mejora operacional, se establecieron criterios de estandarización orientados al control continuo del proceso de perforación diamantina, con la finalidad de mantener la estabilidad operacional, reducir variaciones durante la perforación y asegurar la continuidad de los indicadores operacionales obtenidos durante la aplicación del ciclo PHVA.

4.2.4.2.1. Procedimiento operativo de perforación diamantina

Con la finalidad de mantener la estabilidad operacional y continuidad del proceso de perforación diamantina, se estableció el siguiente procedimiento operativo estandarizado:

- Verificación del estado mecánico del equipo previo al inicio de guardia.

- Inspección del sistema hidráulico, sistema de rotación y sistema de bombeo.
- Revisión del horómetro operacional y cumplimiento del mantenimiento preventivo.
- Preparación y dosificación de fluidos de perforación según las condiciones geomecánicas del terreno.
- Verificación de niveles de circulación y estabilidad del fluido de perforación.
- Control de alineamiento inicial y orientación del sondaje.
- Monitoreo continuo de RPM, presión de avance, torque y caudal de circulación durante la perforación.
- Control periódico de desviación del sondaje mediante seguimiento operacional.
- Supervisión continua de recuperación de testigo y estabilidad del taladro.
- Registro de tiempos improductivos y observaciones operacionales durante cada guardia.
- Verificación final de metros perforados, ROP y condiciones operacionales del sondaje.
- Registro diario de indicadores operacionales para el seguimiento continuo del proceso de perforación diamantina.

4.2.4.2.2. Formato de seguimiento de indicadores

Con la finalidad de mantener el control continuo del proceso de perforación diamantina, se estableció un formato de seguimiento operacional basado en los registros diarios utilizados durante la ejecución de los sondajes diamantinos y control operacional del equipo de perforación.

El formato de seguimiento operacional consideró el registro de los siguientes indicadores:

- Fecha y guardia operacional.
- Código de sondaje.
- Profundidad perforada por guardia.
- Horas efectivas de perforación.

- ROP promedio.
- Recuperación de testigo.
- Inclinación y azimut del sondaje.
- Desviación registrada post perforación.
- Consumo y dosificación de aditivos.
- Tiempos improductivos.
- Paralizaciones mecánicas.
- Observaciones operacionales y condiciones del terreno.
- Control de mantenimiento e inspección operacional del equipo.

Asimismo, el registro continuo de indicadores permitió realizar el seguimiento operacional del proceso de perforación y facilitar la identificación de variaciones durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

Figura 27

Ficha operacional para el control del proceso de perforación diamantina



GeoDrill

FICHA DE SEGUIMIENTO DE INDICADORES PERFORACIÓN DIAMANTINA

CÓDIGO:	GD-FS-01
VERSIÓN:	01
FECHA EMISIÓN:	___/___/___
PÁGINA:	1 de 1

1. DATOS GENERALES

FECHA:	___/___/___	OPERADOR:	
GUARDIA OPERACIONAL:	☐ DÍA ☐ NOCHE	SUPERVISOR:	
CÓDIGO DE SONDAJE:		EMPRESA / PROYECTO:	
EQUIPO DE PERFORACIÓN:		N° DE TURNO:	

2. INDICADORES OPERACIONALES

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	OBSERVACIONES
Profundidad perforada por guardia	m		
Horas efectivas de perforación	h		
ROP promedio	m/h		
Recuperación de testigo	%		
Inclinación del sondaje	°		
Azimut del sondaje	°		
Desviación registrada (post perforación)	m		
Tiempos improductivos	h		
Paralizaciones mecánicas (n° de eventos)	N°		
Horas de paralización total	h		

3. CONTROL DE ADITIVOS

N°	ADITIVO	UNIDAD	CANTIDAD UTILIZADA	DOSIFICACIÓN APLICADA (%) (Manual)	OBSERVACIONES
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

Nota: La dosificación aplicada (%) es definida manualmente por el operador según las condiciones de perforación.

4. CONDICIONES OPERACIONALES DEL TERRENO

- ☐ Terreno competente
- ☐ Terreno fracturado
- ☐ Terreno muy fracturado
- ☐ Presencia de agua
- ☐ Pérdida de circulación
- ☐ Atascamiento de sarta
- ☐ Evacuación deficiente de detritus

Otras condiciones: _____

5. CONTROL DE MANTENIMIENTO E INSPECCIÓN OPERACIONAL

- ☐ Inspección de broca
- ☐ Inspección de barras
- ☐ Inspección de cabezal
- ☐ Revisión de bomba de lodos
- ☐ Revisión de sistema hidráulico
- ☐ Lubricación realizada
- ☐ Mantenimiento preventivo ejecutado

Observaciones de mantenimiento: _____

6. OBSERVACIONES OPERACIONALES Y CONDICIONES DEL TERRENO

ELABORADO POR (OPERADOR)	REVISADO POR (SUPERVISOR)	APROBADO POR (JEFE DE PERFORACIÓN)
NOMBRE: _____	NOMBRE: _____	NOMBRE: _____
FIRMA: _____	FIRMA: _____	FIRMA: _____
FECHA: ___/___/___	FECHA: ___/___/___	FECHA: ___/___/___

Nota: Esta ficha debe ser completada al finalizar cada turno y entregada al Supervisor de Perforación.

Nota: Documento emitido por la Supervisión de Perforación de Geodrill Perú S.A.C.

4.2.4.2.3. Frecuencia de revisión y control operativo

Con la finalidad de asegurar la continuidad de las mejoras obtenidas durante la implementación del ciclo PHVA, se estableció una frecuencia de revisión y control operativo orientada al monitoreo permanente de los parámetros de perforación, condiciones del equipo e indicadores operacionales.

Las actividades de control quedaron definidas de la siguiente manera:

- **Por guardia:** verificación de parámetros operacionales (RPM, presión de avance, torque y caudal), control de fluidos de perforación, registro de metros perforados y tiempos improductivos.
- **Diariamente:** revisión de indicadores operacionales, inspección general del equipo de perforación y validación de los registros operacionales.
- **Semanalmente:** evaluación del desempeño de perforación mediante el análisis de ROP, recuperación de testigo, desviación del sondaje y cumplimiento de metas operacionales.
- **Mensualmente:** revisión del cumplimiento del programa de mantenimiento preventivo, consumo de aditivos de perforación y análisis de tendencias de los indicadores operacionales.
- **Por campaña de perforación:** evaluación integral de resultados y actualización de parámetros operacionales según las condiciones geomecánicas identificadas durante la operación.

Asimismo, la implementación de esta frecuencia de control permite detectar oportunamente desviaciones operacionales, aplicar acciones correctivas y mantener la estabilidad del proceso de perforación diamantina en futuras campañas de perforación.

4.2.4.3. Evaluación económica de la mejora

4.2.4.3.1. Costo de mano de obra

Para la determinación del costo de mano de obra se consideró el personal directamente involucrado en las operaciones de perforación diamantina, incluyendo supervisor de operaciones, perforista y ayudantes perforistas. Asimismo, se evaluaron las remuneraciones, cargas sociales y rendimiento promedio de perforación, con la finalidad de estimar el costo unitario de mano de obra por metro perforado. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 27.

Con tipo de cambio = 3.40 S/./US$, los costos por metro aumentan ligeramente porque cada dólar representa menos soles. Avance promedio considerado: 25 m/guardia.

Tabla 27

Determinación del costo de mano de obra por metro perforado

Mano de obra directa	Cantidad	Sueldo mensual (S/.)	Guardia (S/.)	Costo (US$/m)
Supervisor de operaciones	1	4,600.00	153.33	1.81
Perforista	1	4,000.00	133.33	1.57
Ayudante perforista	2	2,300.00	76.67	1.81
Subtotal mano de obra				**5.19**
Leyes sociales (60%)				**3.11**
Costo total de mano de obra				**8.30 US$/m**

Nota: Elaboración propia.

Figura 28

Actividades operacionales durante la manipulación de tuberías de perforación



Nota: Elaboración Propia

Del análisis realizado se determinó un costo total de mano de obra de 8.30 US$/m, considerando la participación del supervisor de operaciones, perforista y ayudantes perforistas, así como las cargas sociales correspondientes. Este costo representa el componente asociado al recurso humano requerido para la ejecución y control de las actividades de perforación diamantina.

4.2.4.3.2. Costo de máquina perforadora

Para la determinación del costo de la máquina perforadora se consideró el valor de adquisición del equipo GEO 3000 y su vida útil estimada en función de los metros perforados durante su operación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 28.

Tipo de cambio: 3.40 S/./US$. Avance promedio considerado: 25 m/guardia = 82 pies.

Tabla 28

Determinación del costo de máquina perforadora por metro perforado

Equipo	Costo (US$)	Vida útil (pies perforados)	Costo (US$/pie)	Costo (US$/m)
Máquina perforadora GEO 3000	120,000	600,000	0.20	**0.66 US$/m**

Nota: Elaboración propia

Del análisis realizado se determinó un costo unitario de 0.66 US$/m para la máquina perforadora GEO 3000. Este costo corresponde a la depreciación operacional del equipo en función de su vida útil estimada y representa uno de los componentes directos requeridos para la ejecución de los trabajos de perforación diamantina.

Figura 29

Máquina perforadora GEO 3000 utilizada en operaciones de perforación diamantina



Nota: Equipo de perforación diamantina utilizado durante la ejecución de los sondajes.

La Figura 28 muestra la máquina perforadora GEO 3000 empleada en las operaciones de perforación diamantina, equipo utilizado para la ejecución de los sondajes y desarrollo de las actividades operacionales evaluadas durante la investigación.

4.2.4.3.3. Costo de herramientas y otros materiales

Para la determinación del costo de herramientas y otros materiales se consideraron los implementos auxiliares utilizados durante las operaciones de perforación diamantina. El costo

unitario fue calculado considerando el precio de adquisición, vida útil de 90 días, tipo de cambio de 3.40 S/./US$ y un avance promedio de 50 m/día, equivalente a dos guardias de 25 m.

Tabla 29

Costo unitario de herramientas y otros materiales por metro perforado

Descripción	Cantidad	Costo (S/.)	Costo (US$)	Vida útil (días)	Avance considerado (m/día)	Costo (US$/m)
Juego de llaves mixtas	1	146.00	42.94	90	50	0.01
Llave Stilson N° 18	1	65.00	19.12	90	50	0.00
Pala punta redondeada	1	60.00	17.65	90	50	0.00
Pico	1	84.00	24.71	90	50	0.01
Combo	1	70.00	20.59	90	50	0.00
Rod lifter	1	150.00	44.12	90	50	0.01
Llaves Grinsh	1	80.00	23.53	90	50	0.01
Llave S o J	1	120.00	35.29	90	50	0.01
Comba de baquelita	1	79.00	23.24	90	50	0.01
Costo total						**0.06 US$/m**

Nota: Elaboración propia.

Del análisis realizado se determinó un costo total de herramientas y otros materiales de 0.06 US$/m, valor que representa una incidencia baja dentro del costo directo de perforación; sin embargo, estos implementos son necesarios para el soporte operativo, manipulación de tuberías y continuidad de los trabajos de perforación diamantina.

4.2.4.3.4. Costo de implementos de seguridad

Para la determinación del costo de implementos de seguridad se consideraron los equipos de protección personal requeridos para la ejecución de las actividades de perforación diamantina, incluyendo mamelucos, ropa impermeable, casco de seguridad, calzado de seguridad, chaleco reflectivo, guantes, protección respiratoria, protección visual y protección auditiva. Asimismo, el costo unitario fue calculado considerando la cantidad de personal operativo, la vida útil de cada

implemento y las condiciones normales de uso durante las operaciones de perforación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30

Costo unitario de implementos de seguridad por metro perforado

Implemento de seguridad	Cantidad de personal	Costo (S/.)	Costo (US$)	Vida útil (días)	Costo (US$/m)
Mameluco jeans	4	89.00	26.18	180	0.01
Ropa de jebe con capucha	4	76.00	22.35	90	0.02
Casco de seguridad 3M	4	49.00	14.41	360	0.00
Zapato metatarsal	4	160.00	47.06	90	0.04
Chaleco de seguridad	4	35.00	10.29	90	0.01
Guantes de cuero	4	6.00	1.76	30	0.00
Guantes de Hycron	4	12.00	3.53	30	0.00
Respirador 3M para polvo	4	7.00	2.06	90	0.00
Filtro respirador 2097	4	27.00	7.94	30	0.01
Anteojos de seguridad	4	4.00	1.18	30	0.00
Tapón de oído	4	2.50	0.74	30	0.00
Costo total					**0.12 US$/m**

Nota: Elaboración propia.

Del análisis realizado se determinó un costo total de implementos de seguridad de 0.12 US$/m, valor que representa una participación reducida dentro del costo directo de perforación. Sin embargo, estos implementos son indispensables para garantizar la protección del personal, cumplimiento de los estándares de seguridad y continuidad de las operaciones de perforación diamantina.

4.2.4.3.5. Evaluación económica de los materiales de perforación

Con la finalidad de evaluar el impacto de las mejoras implementadas sobre los materiales consumibles de perforación, se realizó una comparación de la vida útil y el costo unitario de los principales accesorios utilizados durante la ejecución de los sondajes diamantinos. Para ello, se

consideró la condición inicial de operación y la condición posterior a la implementación de la estandarización de parámetros operacionales y del uso técnico de aditivos, permitiendo determinar la variación económica generada por la reducción del desgaste de los componentes del sistema de perforación.

Tabla 31

Comparación del costo unitario de los materiales de perforación

Accesorio	Unid.	Costo (US$)	Vida útil antes (m)	P.U. antes (US$/m)	Vida útil después (m)	P.U. después (US$/m)
Broca Fordia	1	593.88	232	2.56	256	2.32
Reaming Shell	1	449.00	1,400	0.32	1,500	0.30
Core Barrel	1	890.00	850	1.05	900	0.99
Tubo interior	1	289.00	4,700	0.06	5,000	0.06
Tubería de perforación	8	2,080.00	760	2.74	800	2.60
Casing Shoe	1	200.00	470	0.43	500	0.40
Costo total				**7.16 US$/m**		**6.67 US$/m**

Nota: Elaboración propia

Del análisis realizado se observa que la implementación de las mejoras operacionales permitió incrementar la vida útil de los principales materiales de perforación, reflejándose en una reducción del costo unitario total de 7.16 US$/m a 6.67 US$/m. La mayor variación se registró en la broca de perforación, cuya vida útil aumentó de 232 m a 256 m, reduciendo su costo por metro perforado.

4.2.4.3.6. Evaluación económica de los aditivos de perforación

Con la finalidad de evaluar el impacto económico de la estandarización en el uso de aditivos de perforación, se comparó el consumo y costo unitario de los principales productos utilizados durante la preparación y acondicionamiento del fluido de perforación. La evaluación consideró la condición inicial de operación y la condición posterior a la implementación de criterios técnicos para la selección de aditivos según las características geológicas y operacionales del terreno.

Tabla 32

Comparación del costo unitario de aditivos de perforación

Aditivo	Costo (US$)	Consumo antes	P.U. antes (US$/m)	Consumo después	P.U. después (US$/m)
Viscosificador	40.09	13 kg	1.67	11 kg	1.41
Bentonita (Toromocho)	95.00	115 kg	3.96	102 kg	3.51
Aus-Det	29.52	9 L	1.23	8 L	1.09
Carbonatada (Control de pH)	3.20	6 kg	0.13	5 kg	0.11
PAC	53.33	8 kg	2.22	7 kg	1.94
Black Hole	44.50	10 kg	1.85	9 kg	1.67
PolyPlus	40.00	10 kg	1.67	9 kg	1.50
Poly Lube	16.58	9 L	0.69	8 L	0.61
Costo total			**13.43**		**11.84**

Nota: Elaboración propia.

Del análisis realizado se determinó una reducción del costo unitario de aditivos de perforación de 13.43 US$/m a 11.84 US$/m, equivalente a una disminución de 11.84 %. Este resultado fue producto de la estandarización en la selección y uso de aditivos según las condiciones geológicas del terreno, optimizando su consumo durante la perforación diamantina.

4.2.4.3.7. Consolidado del costo por metro perforado

Con la finalidad de evaluar el impacto económico de las mejoras implementadas, se realizó la comparación del costo unitario por metro perforado antes y después de la estandarización de los parámetros operacionales y del uso técnico de aditivos durante la perforación diamantina. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33

Comparación del costo unitario de perforación antes y después de la implementación

Concepto	Antes (US$/m)	Después (US$/m)
Mano de obra	8.30	8.30
Máquina perforadora	0.66	0.66
Materiales de perforación	7.16	6.67
Aditivos de perforación	13.43	11.84
Herramientas y otros materiales	0.06	0.06
Implementos de seguridad	0.12	0.12
Costo total	**29.73 US$/m**	**27.65 US$/m**

Nota. Elaboración propia

Del análisis realizado se determinó una reducción del costo unitario de perforación de 29.73 US$/m a 27.65 US$/m, equivalente a una disminución de 7.00 %. Esta mejora se encuentra asociada principalmente al incremento de la vida útil de los materiales de perforación y a la optimización del consumo de aditivos mediante criterios estandarizados de selección y aplicación durante la ejecución de los sondajes diamantinos.

4.2.4.3.8. Costo total por sondaje

Para evaluar el impacto económico de las mejoras implementadas, se determinó el costo total por sondaje considerando el costo unitario de perforación obtenido antes y después de la implementación. Para el análisis se consideró un sondaje representativo de 300 m de longitud, valor utilizado como referencia para comparar el comportamiento económico de la operación.

Tabla 34

Comparación del costo total por sondaje antes y después de la implementación

Concepto	Antes	Después
Longitud del sondaje (m)	300	300
Costo unitario (US$/m)	29.73	27.65
Costo total por sondaje (US$)	**8,919.00**	**8,295.00**
Ahorro por sondaje (US$)		**624.00**

Nota: Elaboración propia

El costo total por sondaje se determinó a partir de los costos unitarios de perforación obtenidos en la estimación económica desarrollada previamente, los cuales fueron calculados considerando la suma de los principales componentes del costo asociados al proceso de perforación diamantina, entre ellos los costos de personal, equipos, materiales de perforación, aditivos, mantenimiento y demás costos operacionales. Como resultado de esta estimación, se obtuvo un costo unitario de 29.73 US$/m antes de la implementación y de 27.65 US$/m después de la aplicación de la metodología PHVA. Posteriormente, estos valores fueron multiplicados por la longitud del sondaje de referencia (300 m), obteniéndose un costo total por sondaje de 8,919.00 US$ en la condición inicial y de 8,295.00 US$ en la condición mejorada, lo que representa un ahorro de 624.00 US$ por sondaje, evidenciando el beneficio económico generado por la optimización de los recursos y la mejora de la eficiencia operativa.

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Estimación Técnica, Económica

La aplicación del ciclo PHVA permitió evaluar integralmente los resultados obtenidos durante la implementación de las mejoras operacionales en las perforaciones diamantinas ejecutadas por la empresa Geodrill en la ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay. La evaluación consideró aspectos técnicos relacionados con la productividad, calidad y estabilidad de los sondajes, así como aspectos económicos asociados a los costos operacionales del proceso.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de acciones orientadas al mantenimiento preventivo, control de trayectoria mediante el sistema TruCore, estandarización de parámetros operacionales, optimización del uso de aditivos y capacitación del personal permitieron mejorar el desempeño global de las perforaciones diamantinas. Asimismo, se observó una

reducción de los tiempos improductivos, una mejora en la recuperación de testigos y una disminución de los costos unitarios de perforación.

La estimación técnica y económica desarrollada permite verificar el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación y demostrar la efectividad de la metodología PHVA como herramienta de mejora continua aplicada a procesos de perforación diamantina.

4.3.1.1. Estimación Técnica

La evaluación técnica permitió determinar el efecto de la implementación del ciclo PHVA sobre el desempeño operacional de las perforaciones diamantinas ejecutadas por la empresa Geodrill en la ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay. Para ello, se consideraron los principales indicadores de productividad y control operacional utilizados durante la ejecución de los sondajes, tales como el avance de perforación, el rendimiento de penetración (ROP), la recuperación de testigo, la desviación del sondaje, los tiempos improductivos y la vida útil de las herramientas de perforación.

La comparación entre la condición inicial y la condición posterior a la implementación de las mejoras permitió identificar las variaciones registradas en cada indicador, así como cuantificar el nivel de mejora alcanzado durante el periodo de evaluación. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35

Resumen de indicadores técnicos obtenidos durante la implementación del ciclo PHVA

Indicador técnico	Antes	Después	Variación (%)
Avance promedio diario (m/día)	45.4	52.4	15.4
Metros perforados por guardia (m/guardia)	22.6	26.2	15.9
ROP promedio (m/h)	3.9	5.1	30.8
Recuperación de testigo (%)	87.0	93.0	6.9
Desviación promedio del sondaje (°)	2.51	1.35	-46.2
Tiempo improductivo (h/día)	6.2	3.2	-48.4
Vida útil promedio de broca (m)	232	256	10.3

Nota. Elaboración propia

La Tabla 32 muestra una mejora de los principales indicadores técnicos de perforación, destacando el incremento del ROP, del avance de perforación y de la recuperación de testigo, así como la reducción de la desviación del sondaje y de los tiempos improductivos.

4.3.1.2. Estimación Económica

La estimación económica se realizó mediante la comparación de los costos operacionales registrados antes y después de la implementación del ciclo PHVA en las perforaciones diamantinas ejecutadas por Geodrill. Para ello, se evaluaron los costos asociados a materiales de perforación, aditivos, equipos, mano de obra y costo total por metro perforado.

Los resultados obtenidos permitieron determinar el impacto económico de las mejoras implementadas sobre el proceso de perforación diamantina. Los valores consolidados se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36

Resumen de indicadores económicos obtenidos durante la implementación del ciclo PHVA

Indicador económico	Antes (US$/m)	Después (US$/m)	Variación (%)
Materiales de perforación	7.16	6.67	-6.84
Aditivos de perforación	13.43	11.84	-11.84
Herramientas y otros materiales	0.06	0.06	0.00
Implementos de seguridad	0.12	0.12	0.00
Costo total de perforación	**29.73**	**27.65**	**-7.00**

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 36 muestra una reducción de los costos operacionales de perforación, destacando principalmente la disminución del costo de aditivos y materiales de perforación. Como resultado, el costo total por metro perforado se redujo de 29.73 US$/m a 27.65 US$/m, generando una mejora económica en el proceso de perforación diamantina.

4.3.2. Categorización de los impactos

La implementación del ciclo PHVA generó impactos positivos en los aspectos técnicos y económicos del proceso de perforación diamantina. Los principales impactos identificados fueron:

- Incremento del avance promedio de perforación.
- Mejora del rendimiento de penetración (ROP).
- Incremento de la recuperación de testigo.
- Reducción de la desviación de los sondajes.
- Disminución de los tiempos improductivos.
- Incremento de la vida útil de las herramientas de perforación.
- Optimización del consumo de aditivos de perforación.
- Reducción del costo por metro perforado.
- Mejora de la continuidad operacional del equipo.

Tabla 37

Categorización de los impactos generados por la implementación del ciclo PHVA

Aspecto	Impacto identificado	Categoría
Productividad	Incremento del avance y ROP	Alto
Calidad del sondaje	Mayor recuperación y menor desviación	Alto
Operación	Menor tiempo improductivo	Alto
Herramientas	Mayor vida útil de brocas	Medio
Costos	Reducción del costo operativo	Medio

Nota: Elaboración propia

4.3.3. Cuadro comparativo entre estado anterior vs mejorado

Con la finalidad de consolidar los resultados obtenidos durante la implementación del ciclo PHVA, se realizó una comparación entre la condición inicial y la condición mejorada del proceso de perforación diamantina. Para ello, se consideraron los principales indicadores técnicos y económicos evaluados durante la investigación. Los resultados comparativos se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38

Comparación de indicadores antes y después de la implementación del ciclo PHVA

Indicador	Estado anterior	Estado mejorado	Variación (%)
Avance promedio diario (m/día)	45.4	52.4	15.4
Metros perforados por guardia (m/guardia)	22.6	26.2	15.9
ROP promedio (m/h)	3.9	5.1	30.8
Recuperación de testigo (%)	87.0	93.0	6.9
Desviación promedio del sondaje (°)	2.51	1.35	-46.2
Tiempo improductivo (h/día)	6.2	3.2	-48.4
Vida útil promedio de broca (m)	232	256	10.3
Costo total de perforación (US$/m)	**29.73 US$/m**	**27.65 US$/m**	**-7.0**

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 38 muestra que la implementación del ciclo PHVA permitió mejorar los principales indicadores del proceso de perforación diamantina. Los mayores cambios se

registraron en la reducción de los tiempos improductivos y de la desviación del sondaje, así como en el incremento del rendimiento de perforación. Asimismo, se evidenció una disminución del costo total por metro perforado, reflejando una mejora tanto técnica como económica del proceso.

4.4. DISCUSIÓN

4.4.1. Factores operacionales que afectan la productividad de la perforación diamantina

Los resultados obtenidos permitieron identificar que los principales factores que afectaban la productividad de la perforación diamantina en Antapaccay fueron los tiempos improductivos, la falta de estandarización de parámetros operacionales, las desviaciones de trayectoria y las deficiencias en el control operativo. Estos hallazgos coinciden con Vergaray y Orihuela (2022), quienes determinaron que la baja productividad en la Unidad Minera San Cristóbal estaba asociada principalmente a tiempos de stand by operativo e inoperativo, problemas de mantenimiento y deficiencias en la recuperación de muestras. Asimismo, guardan relación con Alarcón y Balvin (2025), quienes demostraron que parámetros inadecuados de perforación generan desviaciones que afectan la eficiencia del proceso. Por lo tanto, los resultados obtenidos reafirman que el control de variables operacionales constituye un factor determinante para mejorar la productividad de la perforación diamantina.

4.4.2. Influencia de la aplicación del ciclo PHVA en la productividad

La aplicación del ciclo PHVA permitió incrementar la productividad de perforación desde 22.1 m/guardia hasta 26.5 m/guardia, representando una mejora de 19.9 %, además de contribuir al cumplimiento progresivo de la meta corporativa de 50 m/día. Este resultado es consistente con lo reportado por Salazar Araujo et al. (2023), quienes lograron optimizar el tiempo de perforación en 10 %, incrementar en 23 % las horas efectivas de perforación y superar la meta establecida en 18.95 %. De igual forma, coincide con Vergaray y Orihuela (2022), quienes mejoraron la eficiencia

operativa mediante la reducción de tiempos improductivos. En consecuencia, los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de metodologías de mejora continua permite incrementar significativamente el rendimiento de las operaciones de perforación diamantina.

4.4.3. Influencia de la optimización de parámetros operacionales en el rendimiento de perforación

La estandarización de parámetros operacionales implementada mediante el ciclo PHVA permitió mejorar el control del proceso de perforación y reducir las variaciones operativas que afectaban el rendimiento de los sondajes. Estos resultados coinciden con Alarcón y Balvin (2025), quienes determinaron que una presión de torque entre 2900–3000 PSI, una presión de avance entre 900–1000 PSI, una velocidad de rotación entre 1000–1200 RPM y un peso sobre la corona entre 3100–3200 PSI permitieron reducir la desviación hasta 0.01° en DIP y 0.08° en AZIMUTH. Asimismo, guardan relación con Cao et al. (2019), quienes demostraron que la optimización de las condiciones de perforación incrementó la velocidad de penetración entre 1.18 y 2.20 veces respecto al método convencional. Por ello, se confirma que el adecuado control de los parámetros operacionales influye directamente en la eficiencia y productividad de la perforación diamantina.

4.4.4. Impacto económico de la mejora de productividad en la perforación diamantina

La aplicación del ciclo PHVA permitió reducir el costo de perforación de 29.73 US$/m a 27.65 US$/m, representando una disminución de aproximadamente 7 %. Este resultado se relaciona con los hallazgos de Salazar Araujo et al. (2023), quienes demostraron que la optimización de tiempos y el incremento de horas efectivas de perforación generaron mejoras en el desempeño operativo del proyecto, así como con Vergaray y Orihuela (2022), quienes evidenciaron que la reducción de tiempos improductivos disminuye las pérdidas asociadas a la baja eficiencia. En ambos casos, al igual que en la presente investigación, la mejora de la

productividad permitió optimizar el uso de recursos y reducir los costos operacionales, confirmando que la aplicación de metodologías de mejora continua genera beneficios técnicos y económicos en las operaciones de perforación diamantina.

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se mejoró la productividad de las perforaciones diamantinas ejecutadas por Geodrill en la ampliación del Tajo Sur de la Compañía Minera Antapaccay mediante la aplicación del ciclo PHVA, incrementándose el avance promedio diario de 45.4 m/día a 52.4 m/día y los metros perforados por guardia de 22.6 m/guardia a 26.2 m/guardia, evidenciando una mejora sostenida del proceso de perforación.

1. Los principales factores que afectaban el desempeño de las perforaciones diamantinas fueron los elevados tiempos improductivos, la desviación de los sondajes, la variabilidad de los parámetros operacionales y el uso no estandarizado de aditivos de perforación. Estas condiciones generaban una menor eficiencia operativa, reflejada en un ROP promedio de 3.9 m/h, una recuperación de testigo de 87 % y una desviación promedio de 2.51°.

2. La aplicación de la metodología PHVA permitió mejorar la calidad y eficiencia del proceso de perforación diamantina, incrementando el ROP de 3.9 m/h a 5.1 m/h y la recuperación de testigo de 87 % a 93 %. Asimismo, la desviación promedio de los sondajes se redujo de 2.51° a 1.35° y los tiempos improductivos disminuyeron de 6.2 h/día a 3.2 h/día, contribuyendo a una mayor estabilidad operacional.

3. Los costos de avance lineal de perforación se redujeron de 29.73 US$/m a 27.65 US$/m mediante la aplicación del ciclo PHVA. Esta mejora económica estuvo asociada principalmente a la reducción del consumo de aditivos, el incremento de la vida útil de las herramientas de perforación y la mejora de la eficiencia operacional del proceso.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al área de Perforación de Geodrill mantener la aplicación del ciclo PHVA como herramienta de mejora continua, realizando el seguimiento periódico de los indicadores de productividad, con la finalidad de conservar los resultados obtenidos en avance de perforación y rendimiento operacional.

1. Se recomienda al área de Operaciones fortalecer el control y monitoreo de los factores que afectan el desempeño de las perforaciones diamantinas, principalmente la desviación de los sondajes, los tiempos improductivos, la dosificación de aditivos y la estandarización de parámetros operacionales.

2. Se recomienda al área de Supervisión de Perforación continuar con la aplicación de las mejoras implementadas durante la investigación, especialmente el uso del sistema TruCore, la estandarización de parámetros de perforación y la capacitación continua del personal, a fin de mantener la calidad y eficiencia del proceso de perforación diamantina.

3. Se recomienda al área de Planeamiento y Costos realizar evaluaciones periódicas del costo por metro perforado y del consumo de materiales y aditivos, con el propósito de identificar oportunidades de optimización y mantener la reducción de costos obtenida mediante la aplicación del ciclo PHVA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alarcón Véliz, E. J., & Balvín Valladolid, J. W. (2025). Optimización de parámetros de perforación con sistema diamantina para el control de desviación de la trayectoria del taladro en la U.M. Parcoy – Pataz La Libertad 2025 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica].

Boart Longyear. (2014). Drilling services catalog. Boart Longyear. https://www.boartlongyear.com

Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. S. (1986). Applied drilling engineering. Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/9781555630010

Cao, X., Kozhevnykov, A., Dreus, A., & Liu, B.-C. (2019). Diamond core drilling process using intermittent flushing mode. Arabian Journal of Geosciences, 12(137). https://doi.org/10.1007/s12517-019-4287-2

Darling, P. (Ed.). (2011). SME mining engineering handbook (3rd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. https://www.smenet.org/What-We-Do/Technical-Briefings/SME-Mining-Engineering-Handbook

Davenport, T. H. (1993). Process innovation: Reengineering work through information technology. Harvard Business School Press. https://books.google.com/books?id=PMhTAAAAMAAJ

Deming, W. E. (1986). Out of the crisis. MIT Press. https://mitpress.mit.edu/9780262541152/out-of-the-crisis/

Deming, W. E. (1986). Out of the crisis. MIT Press. https://mitpress.mit.edu/9780262541150/out-of-the-crisis/

Dirección de Desarrollo Estratégico. (2020, diciembre). Aplicación del ciclo de Deming o PDCA para la gestión de la calidad en la educación superior: una introducción (DDD N.° 4). Universidad de Concepción. https://desarrolloestrategico.udec.cl/wp-content/uploads/2021/01/DDD-N-4-Ciclo-Deming.pdf

Hammer, M., & Champy, J. (1993). Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution. Harper Business. https://books.google.com/books?id=Gd0WQgAACAAJ

Harrington, H. J. (1991). Business process improvement: The breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness. McGraw-Hill. https://books.google.com/books?id=F2pQAAAAMAAJ

Hartman, H. L. (1987). Introductory mining engineering. John Wiley & Sons. https://archive.org/details/introductorymini00hart

Ishikawa, K. (1985). What is total quality control? The Japanese way. Prentice Hall. https://archive.org/details/whatisqualitycon00ishi

Juran, J. M. (1990). Juran on leadership for quality. Free Press. https://books.google.com/books?id=4k9RAAAAMAAJ

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). The balanced scorecard: Translating strategy into action. Harvard Business School Press. https://books.google.com/books?id=9oEBAAAACAAJ

Koontz, H., & Weihrich, H. (2012). Essentials of management: An international perspective (9th ed.). McGraw-Hill. https://www.mheducation.com

Lapeyrouse, N. J. (2002). Formulas and calculations for drilling, production, and workover (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. https://www.sciencedirect.com/book/9780750671514/formulas-and-calculations-for-drilling-production-and-workover

Montgomery, D. C. (2009). Introduction to statistical quality control (6th ed.). John Wiley & Sons. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470404681

Parmenter, D. (2015). Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs (3rd ed.). John Wiley & Sons. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119011711

Pathak, K. (s.f.). Introduction to drilling technology for surface mining. Indian Institute of Technology Kharagpur. https://nptel.ac.in/courses/123/105/123105008/

Prassl, W. F. (s.f.). Drilling engineering. Curtin University of Technology. https://es.scribd.com/document/338635829/Drilling-Engineering-Prassl

Provost, F., & Fawcett, T. (2013). Data science for business. O'Reilly Media. https://www.oreilly.com/library/view/data-science-for/9781449374273/

Robbins, S. P., & Coulter, M. (2014). Management (12th ed.). Pearson. https://www.pearson.com

Salazar Araujo, L. A., Trefogli Voto Bernales, M., & Del Savio, A. A. (2023). A VDC framework proposal for time optimization in diamond drilling operations for mining. Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31), 1582–1592. https://doi.org/10.24928/2023/0233

Tatiya, R. R. (2013). Surface and underground excavations: Methods, techniques and equipment (2nd ed.). CRC Press. https://www.routledge.com/Surface-and-Underground-Excavations/Tatiya/p/book/9780415463027

Vergaray Diestra, E. R., & Orihuela Barriga, M. E. (2022). Propuesta de mejora para optimizar los tiempos de perforación efectiva con la finalidad de incrementar la productividad en una contrata de perforación diamantina de la Unidad Minera San Cristóbal aplicando ingeniería

de métodos y TPM [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. http://hdl.handle.net/10757/659006

ANEXOS

ANEXO 1:

REFERENCIA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación

El área de estudio se ubica en el sur del Perú, en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, departamento del Cusco, dentro de las operaciones de la Compañía Minera Antapaccay. La investigación se desarrolla en el Tajo Sur, el cual corresponde a una operación minera a cielo abierto.

Esta zona se encuentra aproximadamente a 4100 m s.n.m., en un entorno típico de la región altoandina, donde las condiciones de clima y terreno forman parte del desarrollo diario de las actividades mineras.

Al encontrarse dentro de una operación en funcionamiento, el área de estudio cuenta con accesos y zonas de trabajo ya definidas, lo que permite realizar actividades como la perforación diamantina de manera más ordenada y controlada, considerando siempre las condiciones propias del lugar.

Tabla 39

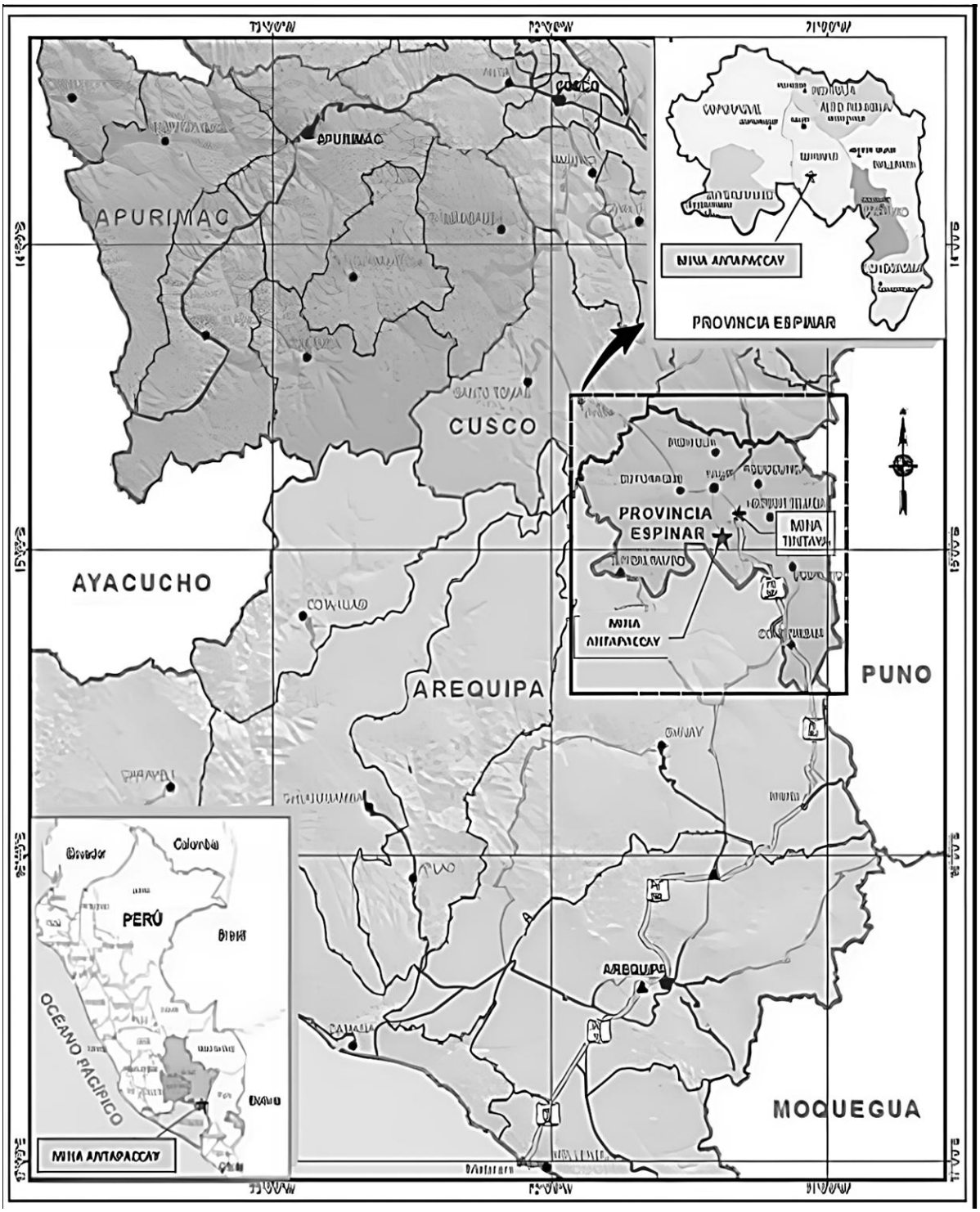
Coordenadas de las principales áreas de la Unidad Minera Antapaccay

Área / Referencia	Zona UTM	Este (m)	Norte (m)
Yauri (Espinar)	19 S	239 500	8 334 500
Tajo Sur	19 S	240 800	8 336 800

Fuente: SENACE (2016)

Figura 30

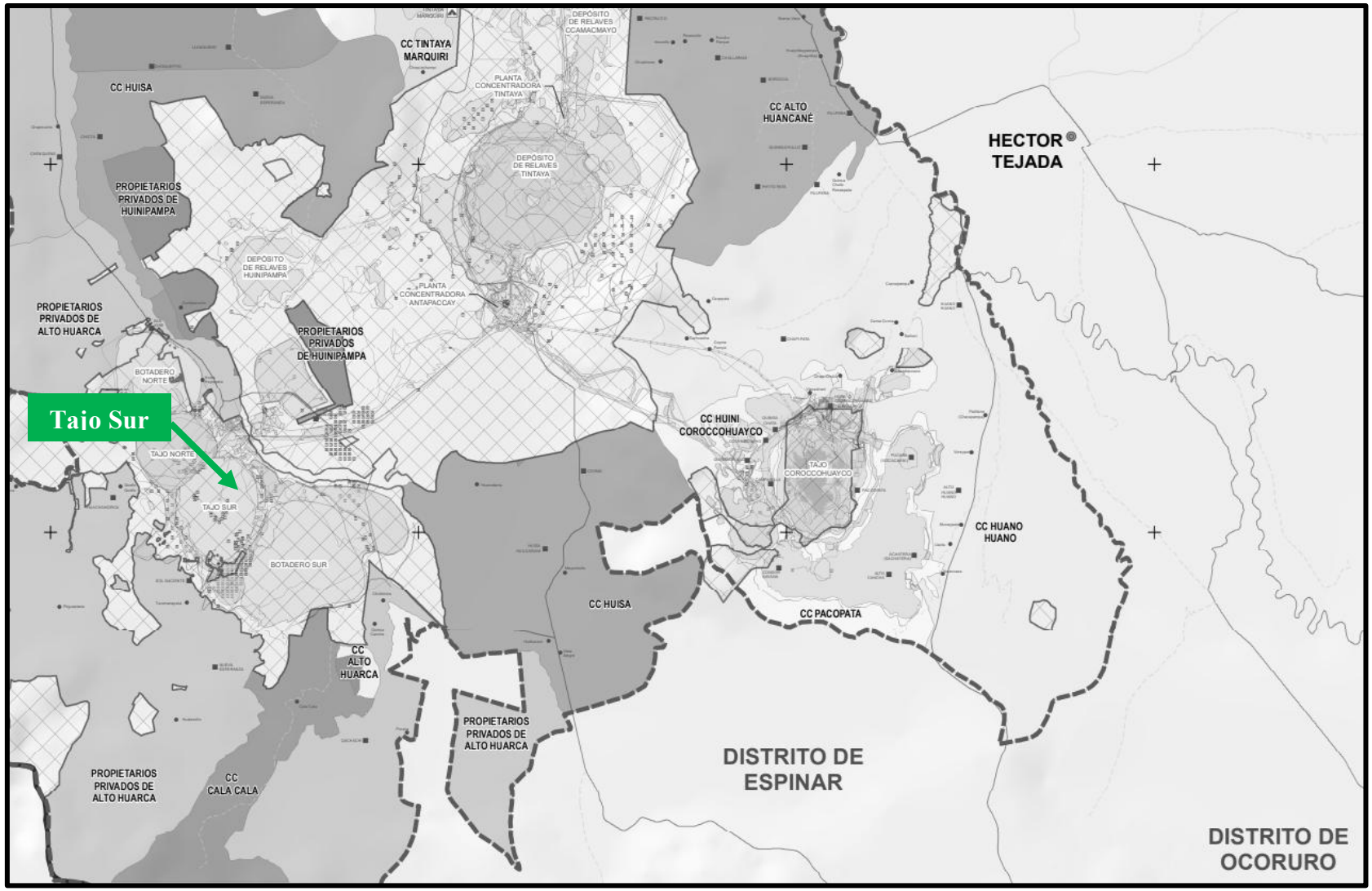
Ubicación de operaciones de CM Antapaccay



Nota: C.M. Antapaccay

Figura 31

Ubicación de las operaciones Tajo Sur y Tajo Norte de la CM Antapaccay



Nota: C.M. Antapaccay

Accesibilidad

El acceso al área de estudio, ubicada en el Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay, se realiza desde la ciudad del Cusco siguiendo la ruta Cusco – Sicuani – Yauri, a través de una vía asfaltada en condiciones operativas adecuadas. El tiempo de viaje hasta la provincia de Espinar es aproximadamente de 6 a 7 horas, considerando tramos continuos de desplazamiento por carretera.

Desde la ciudad de Yauri, el acceso al Tajo Sur se realiza mediante una carretera afirmada y vías internas de la operación minera, con una distancia aproximada de 15 km y un tiempo de recorrido de entre 30 a 45 minutos. Estas vías permiten el tránsito regular de equipos, maquinaria y personal hacia las diferentes zonas operativas.

Es importante considerar que, durante la época de lluvias, las condiciones de acceso pueden verse afectadas debido al estado de las vías afirmadas, lo cual puede generar retrasos en el traslado de equipos y en la ejecución de actividades en campo. Por ello, estas condiciones son tomadas en cuenta dentro de la planificación operativa de la unidad minera.

Tabla 40

Caracterización de las rutas de acceso hacia el Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay

Etapa de recorrido	Trayecto	Condición de la vía	Longitud (km)	Duración estimada
Etapa 1	Cusco – Sicuani	Vía asfaltada	135	2.5 – 3 horas
Etapa 2	Sicuani – Yauri	Vía asfaltada	121	3 – 4 horas
Etapa 3	Yauri – Tajo Sur	Vía afirmada	15	30 – 45 minutos

Nota: Elaboración Propia

Clima

El área de estudio presenta un clima altoandino con dos estaciones bien marcadas: una temporada de lluvias entre diciembre y marzo, donde se incrementa la presencia de agua en superficie, y una temporada seca durante el resto del año. Estas precipitaciones pueden afectar las condiciones de trabajo dentro del tajo, especialmente en actividades de campo.

Las temperaturas son bajas debido a la altitud, con valores que pueden acercarse a 0 °C durante la noche y primeras horas del día, mientras que durante el día se presentan condiciones más moderadas. Estas variaciones térmicas deben considerarse en la planificación de las operaciones en mina.

Hidrología

l área de estudio se ubica dentro de la subcuenca del río Cañipia, donde la disponibilidad de agua está influenciada principalmente por las precipitaciones estacionales y aportes subterráneos. Durante la temporada de lluvias se incrementa el escurrimiento superficial, generando acumulación de agua en zonas operativas del tajo, mientras que los aportes subterráneos mantienen presencia continua de humedad en el terreno. Estas condiciones deben considerarse en la ejecución de actividades como la perforación diamantina, ya que influyen en la estabilidad de las plataformas, control de agua y desempeño del proceso de perforación.

Topografía y Relieve

El área de estudio presenta un relieve característico de zona altoandina, con pendientes variables y una topografía irregular que incluye laderas y zonas de depresión dentro del tajo. Estas condiciones influyen en la disposición de las plataformas de trabajo y en el desarrollo de las actividades operativas.

La configuración del terreno debe ser considerada en la ejecución de la perforación diamantina, ya que afecta la estabilidad de las plataformas, la accesibilidad a los puntos de perforación y el control de la inclinación de los sondajes.

Geología del Área de Estudio

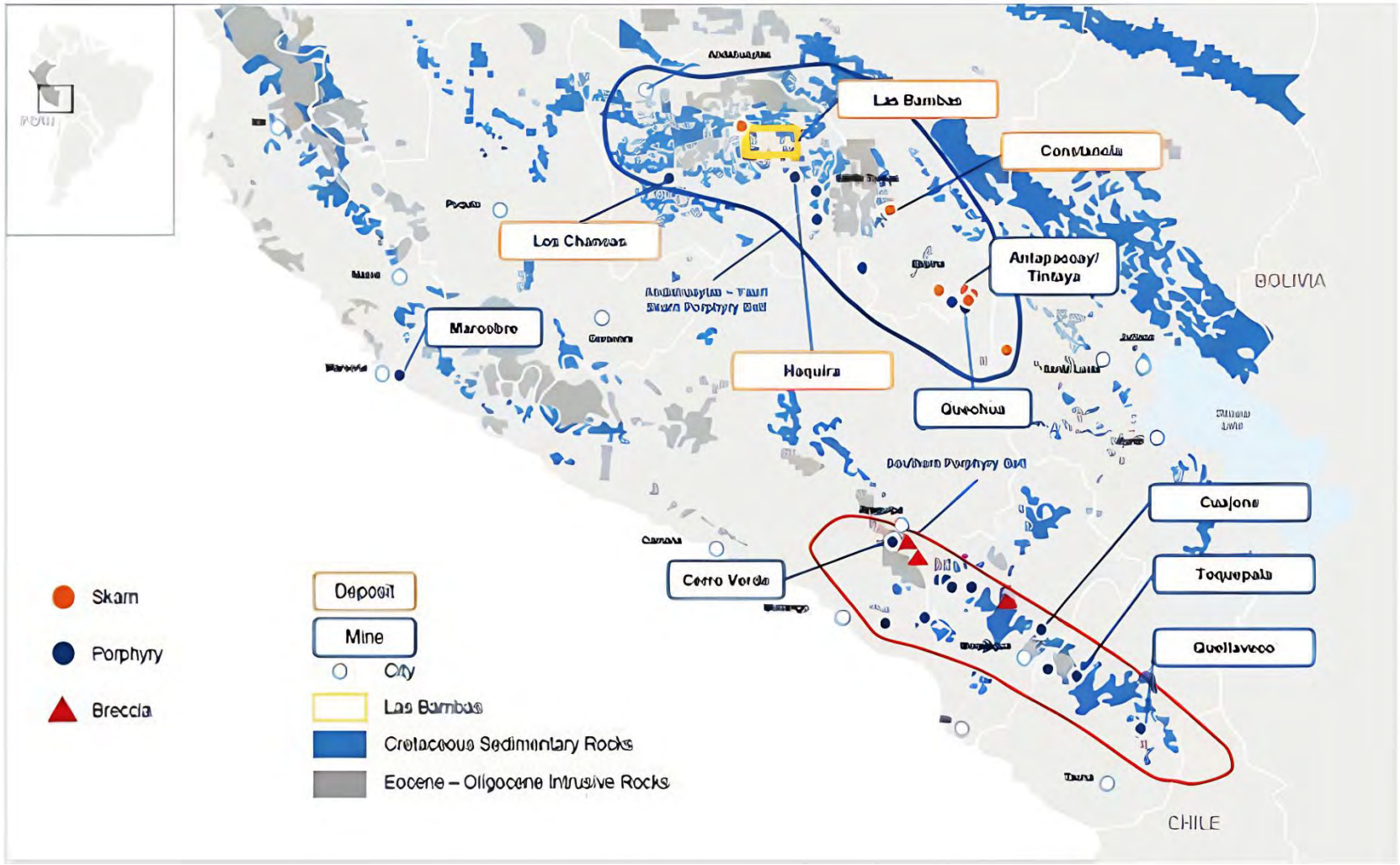
El área de estudio se ubica dentro del cinturón Andahuaylas–Yauri y está asociada a un sistema tipo pórfido de cobre. En la Unidad Minera Antapaccay predominan intrusivos porfiríticos

de composición diorítica a monzonítica, los cuales se encuentran emplazados en rocas sedimentarias del Cretácico, principalmente calizas y areniscas.

Estas unidades han sido afectadas por procesos de alteración hidrotermal, generando zonas con diferente competencia de roca. Esta variabilidad influye en la perforación diamantina, especialmente en la recuperación de testigo y estabilidad de los taladros.

Figura 32

Plano de Franja Eocena-Oligocena del cinturón Andahuaylas-Yauri



Nota: Área de Geología - CM Antapaccay

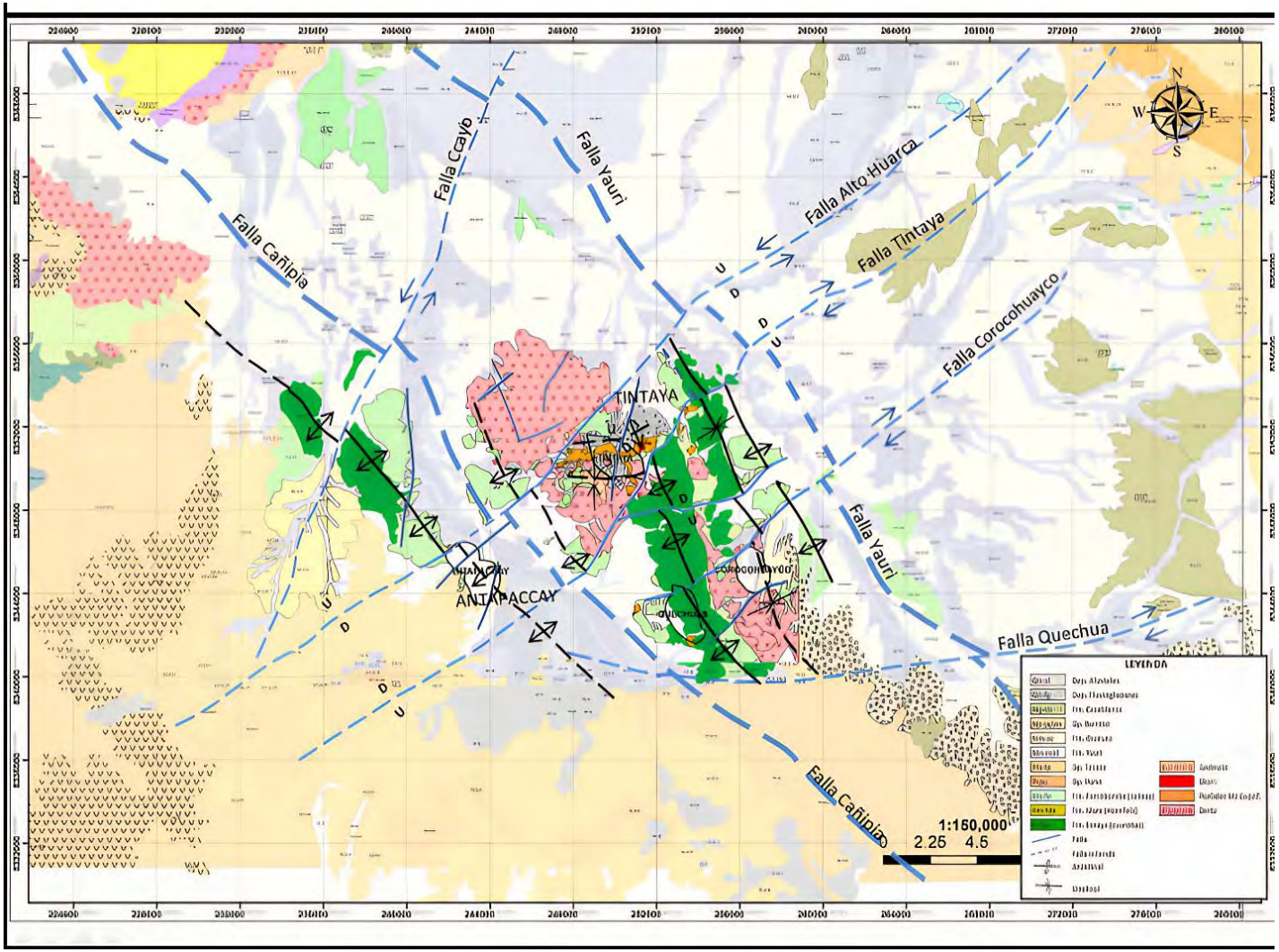
Geología Regional

El área de estudio se ubica en el extremo sureste del cinturón Andahuaylas–Yauri, dentro del distrito minero de Tintaya. Regionalmente predominan secuencias sedimentarias cretácicas constituidas por las formaciones Soraya, Mara y Ferrobamba, posteriormente deformadas por la tectónica andina.

Estas unidades fueron intruidas por cuerpos del Batolito Andahuaylas–Yauri, principalmente dioritas, microdioritas y stocks monzoníticos. El emplazamiento de estos intrusivos y su interacción con las rocas sedimentarias favorecieron el desarrollo de depósitos tipo pórfido y skarn de cobre en el distrito minero.

Figura 33

Plano geológico---estructural del distrito minero de Tintaya



Nota: A. Maldonado (2006) e INGEMMET.

Geología Local

El yacimiento Antapaccay presenta un sistema mineralizado tipo pórfido–skarn de Cu–Ag–Au. En el Tajo Sur, los cuerpos intrusivos de composición intermedia cortan las secuencias sedimentarias cretácicas, generando zonas de contacto, alteración hidrotermal y mineralización.

La caracterización del Tajo Sur se obtiene principalmente mediante perforación diamantina y mapeo geológico de bancos, debido a la limitada exposición de afloramientos por la presencia de coberturas superficiales. Esta información permite identificar cambios litológicos, estructurales y de alteración relevantes para la interpretación del yacimiento.

Litología

En el Tajo Sur predominan rocas intrusivas de composición intermedia, principalmente pórfidos monzoníticos y dioritas. Para Antapaccay Sur se reconocen cuerpos como Pórfido 74 y Pórfido 80, asociados al sistema intrusivo mineralizado.

Las rocas sedimentarias están representadas principalmente por las calizas de la Formación Ferrobamba, además de unidades de la Formación Mara y Soraya. En los contactos entre los intrusivos y las calizas se desarrollan mármol, skarn y hornfels. También se presentan brechas hidrotermales, tobas, depósitos del Grupo Maure y materiales cuaternarios.

La variabilidad litológica genera cambios en la competencia, abrasividad y fracturamiento de la roca, condicionando el rendimiento de la perforación diamantina.

Alteración Hidrotermal

Las principales alteraciones hidrotermales reconocidas en Antapaccay corresponden a alteración potásica, silicificación, alteración propilítica, alteraciones argílicas, endoskarn y exoskarn.

La alteración potásica se desarrolla principalmente en los cuerpos porfiríticos, mientras que el endoskarn y exoskarn se presentan en zonas de contacto entre los intrusivos y las rocas carbonatadas. La silicificación está asociada a sectores con intenso venilleo de cuarzo.

Las zonas intensamente alteradas pueden presentar cambios de resistencia y mayor fracturamiento, favoreciendo pérdidas de circulación, desgaste de herramientas y disminución de la recuperación de testigo.

Mineralización

La mineralización de cobre está constituida principalmente por calcopirita y bornita, acompañadas localmente por calcocita y molibdenita.

Los sulfuros se presentan como diseminaciones, vetillas, stockwork y brechas hidrotermales, principalmente dentro de los cuerpos porfiríticos y en las zonas de contacto. En los sectores de skarn, la mineralización se encuentra asociada a minerales como granate, magnetita y piroxeno.

La distribución de estos minerales permite identificar sectores de interés para el seguimiento mediante perforación diamantina.

Geología Estructural

La configuración estructural regional está controlada por sistemas de fallas y pliegues desarrollados durante la tectónica andina. Los pliegues presentan una orientación predominante NNW–SSE, mientras que los principales sistemas de fallas muestran orientaciones NW–SE, NE–SW, NNE–SSW y E–W.

Entre las estructuras regionales destacan las fallas Cañipia y Yauri, de orientación NW–SE, y las fallas Alto Huarca y Tintaya, de orientación NE–SW. También se reconocen las fallas Ccayo y Quechua.

En Antapaccay Sur, el emplazamiento del sistema porfirítico se encuentra relacionado con una estructura anticlinal de orientación NNW–SSE. Asimismo, se presentan fallas postmineralización con orientaciones NE–SW y E–W.

Estas estructuras generan zonas de fracturamiento y discontinuidad que pueden favorecer desviaciones de sondaje, pérdida de circulación, inestabilidad de paredes y atascamiento de la sarta durante la perforación diamantina.

Geología Económica

Antapaccay constituye un depósito de importancia económica asociado principalmente a un sistema tipo pórfido de Cu–Ag–Au, con mineralización complementaria tipo skarn en los contactos entre los intrusivos y las rocas carbonatadas.

La mineralización económica se concentra principalmente en pórfidos mineralizados, brechas hidrotermales, zonas de stockwork y cuerpos de skarn. La distribución de las leyes está controlada por la interacción entre litología, alteración hidrotermal, intensidad de venilleo y estructuras geológicas.

Los cuerpos porfiríticos presentan principalmente mineralización diseminada y en vetillas de calcopirita–bornita, mientras que las brechas hidrotermales y zonas de skarn pueden concentrar mayores contenidos de sulfuros.

En el Tajo Sur, la perforación diamantina permite definir la continuidad lateral y vertical de estos cuerpos mineralizados, densificar la información geológica mediante sondajes infill y mejorar la estimación de recursos minerales.