



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Evaluación de la transición tecnológica de la perforación convencional a la
perforación autónoma en una mina superficial en el sur del Perú, Arequipa
2024**

Tesis presentada por:

Sirlupu Zarate, Cristhian Alexander

ORCID: 0009-0002-5185-0956

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Mayo del 2026

Dictamen: 017533-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 017533, presentado por:

2015800191 - SIRLUPU ZARATE CRISTHIAN ALEXANDER

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA TRANSICIÓN TECNOLÓGICA DE LA PERFORACIÓN CONVENCIONAL A LA
PERFORACIÓN AUTÓNOMA EN UNA MINA SUPERFICIAL EN EL SUR DEL PERÚ, AREQUIPA 2024**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**40656104 - LOPEZ CASAPERALTA DE DIAZ PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



**46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR**



EVALUACIÓN DE LA TRANSICIÓN TECNOLÓGICA DE LA PERFORACIÓN CONVENCIONAL A LA PERFORACIÓN AUTÓNOMA EN UNA MINA SUPERFICIAL EN EL SUR DEL PERÚ, AREQUIPA 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	3%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	vsip.info	1%
	Fuente de Internet	
4	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
5	www.mdpi.com	<1%
	Fuente de Internet	
6	idoc.pub	<1%
	Fuente de Internet	
7	www.slideshare.net	<1%
	Fuente de Internet	
8	core.ac.uk	<1%
	Fuente de Internet	
9	Submitted to Universidad Tecnológica del Peru	<1%
	Trabajo del estudiante	

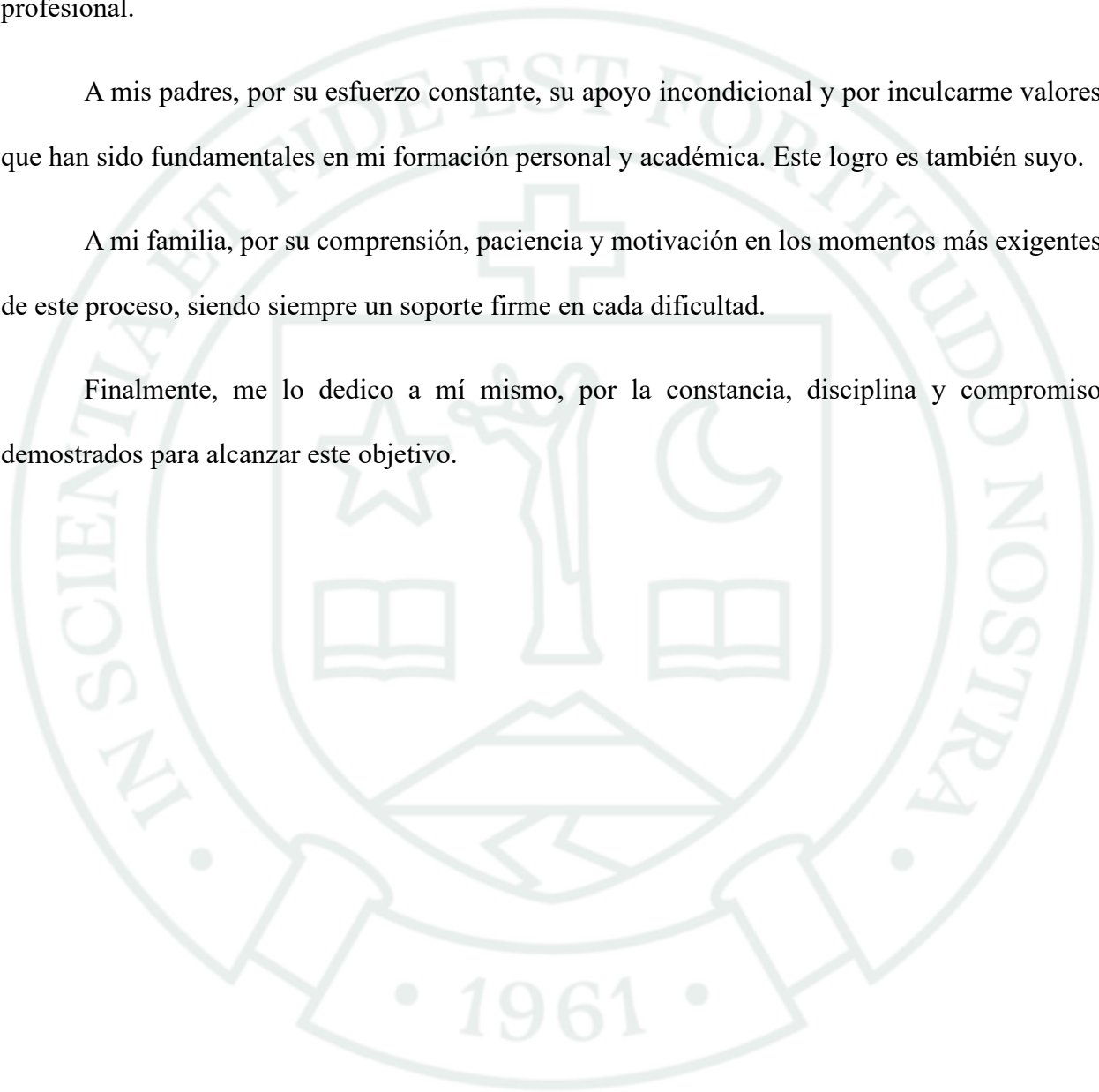
DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios, por guiar cada paso de mi camino y brindarme la fortaleza necesaria para culminar esta etapa importante de mi vida profesional.

A mis padres, por su esfuerzo constante, su apoyo incondicional y por inculcarme valores que han sido fundamentales en mi formación personal y académica. Este logro es también suyo.

A mi familia, por su comprensión, paciencia y motivación en los momentos más exigentes de este proceso, siendo siempre un soporte firme en cada dificultad.

Finalmente, me lo dedico a mí mismo, por la constancia, disciplina y compromiso demostrados para alcanzar este objetivo.



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, por haberme brindado la formación académica necesaria y las herramientas para desarrollarme como profesional en Ingeniería de Minas.

A mi asesor de tesis, por su orientación, exigencia académica y valiosos aportes durante el desarrollo de la presente investigación, los cuales fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados.

A la unidad minera donde se desarrolló el estudio, así como a los profesionales y técnicos que colaboraron en la recolección de datos, por su disposición, apoyo y por compartir su experiencia en campo, lo cual enriqueció significativamente este trabajo.

A mis docentes, quienes a lo largo de mi formación contribuyeron con sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, fortaleciendo mi criterio profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia y a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo, motivación y confianza durante este proceso.

EPÍGRAFE

“La automatización en minería no solo incrementa la productividad, sino que redefine los estándares de seguridad y precisión operativa.”



RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó comparativamente la transición tecnológica de la perforación convencional a la perforación autónoma en una mina superficial del sur del Perú. Mediante un diseño explicativo-comparativo, para tal efecto se analizaron cuatro perforadoras (dos convencionales modelos Epiroc DM45 y dos autónomas modelo Epiroc Pit Viper 351 con sistemas RCS y Mobius for Drills) bajo condiciones operativas equivalentes durante el año 2024.

Para un correcto análisis se evaluaron indicadores clave de desempeño (KPIs) considerando cuatro dimensiones: técnicos (precisión y calidad de los taladros), operativos (disponibilidad, tiempo de ciclo y penetración), económicos (costo por metro perforado y por hora de operación) y de seguridad laboral (horas-hombre expuestas e incidentes). Los resultados, presentados en las Tablas 9, 12, 15 y 20, demostraron que la perforación autónoma superó significativamente al sistema convencional en todos los indicadores analizados registrando incluso reducciones de hasta 61% en las desviaciones de los taladros, y un incremento de 6,4 puntos porcentuales en disponibilidad operativa, una reducción del 5,7 % en el costo por metro perforado y una reducción del 63,9 % en las horas-hombre expuestas, con eliminación total de incidentes reportados.

Por lo tanto, se concluye que la perforación autónoma constituye una alternativa tecnológica viable, eficiente y segura para las operaciones mineras superficiales del sur del Perú, contribuyendo significativamente con la mejora de la productividad, la reducción de costos y la protección de la integridad del personal.

Palabras clave: Perforación autónoma, perforación convencional, minería superficial.

ABSTRACT

This research evaluated the technological transition from conventional drilling to autonomous drilling in a surface mine in southern Peru. Through an explanatory-comparative design, four drill rigs were analyzed (two conventional Epiroc DM45 and two autonomous Epiroc Pit Viper 351 equipped with RCS and Mobius for Drills) under equivalent operating conditions during 2024.

Key performance indicators (KPIs) were assessed across four dimensions: technical (drill accuracy and quality), operational (availability, cycle time, and penetration rate), economic (cost per drilled meter and cost per operating hour), and occupational safety (man-hours exposed and reported incidents). The results, presented in Tables 9, 12, 15, and 20, demonstrated that autonomous drilling significantly outperformed the conventional system across all indicators: reductions of up to 61% in drill deviations, an increase of 6.4 percentage points in operational availability, a 15.7% decrease in cost per drilled meter, and a 63.9% reduction in man-hours exposed, with the complete elimination of reported incidents.

It is concluded that autonomous drilling represents a viable, efficient, and safe technological alternative for surface mining operations in southern Peru, contributing to improved productivity, cost reduction, and enhanced personnel safety.

Keywords: autonomous drilling, conventional drilling, surface Mining.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1. Planteamiento del problema 4

1.1 Descripción del problema 4

1.2 Objetivos del proyecto 5

1.2.1 Objetivo general..... 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 Preguntas de investigación..... 6

1.3.1 Pregunta principal 6

1.3.2 Preguntas específicas 6

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema 7

1.5 Palabra clave 7

1.6 Justificación e importancia 7

CAPÍTULO II 9

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 10

2.1 Estado del arte..... 10

2.1.1 Antecedentes de la investigación 15

2.1.2 Antecedentes de la investigación internacionales..... 16

2.1.3 Antecedentes Nacionales 21

2.1.4 Antecedentes Locales..... 24

2.2 Hipótesis general..... 27

2.2.1 Hipótesis específicas..... 27

2.3 Variables de la investigación..... 28

2.3.1 Variable dependiente 28

2.3.2 Variable independiente..... 28

CAPÍTULO III..... 30

3. Metodología..... 31

3.1	Tipo y nivel de investigación.....	31
3.2	Población.....	31
3.3	Muestra	31
3.4	Alcances.....	32
3.5	Limitaciones	34
3.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
3.6.1	Métodos para la recopilación de datos.....	36
3.6.2	Herramientas de recolección de datos.....	36
3.6.3	Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)	37
3.7	Ficha técnica de los equipos utilizados.....	38
3.8	Formatos de registro de operación diaria.....	46
3.9	Proyecto de perforación digital.....	49
3.10	Procedimiento de validación.....	50
3.11	Lista de verificación de seguridad laboral	50
3.12	Software de monitoreo y control.....	52
3.13	Proceso de implementación de procedimientos.....	56
3.13.1	Evaluación de la efectividad técnica.....	56
3.13.2	Evaluación de la eficacia operativa.....	61
3.13.3	Evaluación de costos operacionales.....	63
CAPÍTULO IV.....		70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1	Análisis e interpretación de resultados.....	71
4.1.1	Calidad y precisión de los taladros	71
4.1.2	Eficacia operativa	72
4.1.3	Costos operacionales	72
4.1.4	Seguridad laboral.....	73
4.1.5	Integración de los resultados.....	74
CONCLUSIONES		76
RECOMENDACIONES.....		78
REFERENCIAS.....		80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización de las variables	29
Tabla 2	Evaluación de tiempos, perforación y disponibilidad en perforación convencional.....	47
Tabla 3	Evaluación de tiempos, perforación y disponibilidad en perforación autónoma	48
Tabla 4	Coordenadas de referencia zona de prueba	50
Tabla 5	Checklist de seguridad laboral – Perforación Convencional	51
Tabla 6	Checklist de seguridad laboral – Perforación Autónoma	52
Tabla 7	Reporte de resultados de la perforadora convencional.....	56
Tabla 8	Reporte de resultados de la perforadora autónoma	58
Tabla 9	Comparación de promedios de perforadora convencional vs perforadora autónoma	59
Tabla 10	Disponibilidad y tiempos de ciclo en perforación convencional	61
Tabla 11	Disponibilidad y tiempos de ciclo en perforación autónoma	62
Tabla 12	Comparación de promedios entre perforación convencional y autónoma	62
Tabla 13	Costos operacionales en perforación convencional	63
Tabla 14	Costos operacionales en perforación autónoma	64
Tabla 15	Comparativa de promedios entre perforación convencional y autónoma	64
Tabla 16	Checklist de Seguridad Laboral – Perforación Convencional	65
Tabla 17	Checklist de Seguridad Laboral – Perforación Autónoma	66
Tabla 18	Horas-hombre expuestas e incidentes en perforación convencional.....	67
Tabla 19	Horas-hombre expuestas e incidentes en perforación autónoma	67
Tabla 20	Comparativa de promedios entre perforación convencional y autónoma	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perforadora rotativa de superficie Modelo Epiroc DM45 - Convencional	41
Figura 2 Perforadora automatizada Modelo Pit Viper 351	45
Figura 3 Reporte – RCS Logs (Rig Control System)	54
Figura 4 Reporte – Mobius for Drills	55
Figura 5 Pantalla de monitoreo Mobius for Drills	56



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Convencional	84
Anexo 2 Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Autónoma	85
Anexo 3 Perforadora autónoma en operación en la mina Quellaveco.....	86
Anexo 4 Prueba piloto de perforadora autónoma en Cerro Verde.....	87
Anexo 5 Cabina de control remoto para perforadoras autónomas	88
Anexo 6 Ubicación de minas en transición tecnológica en Perú.....	89



INTRODUCCIÓN

La minería superficial ha experimentado una evolución constante en sus métodos y tecnologías, especialmente en los procesos que influyen directamente en la calidad y continuidad de la operación, la perforación ocupa un lugar central en este proceso, ya que determina la eficiencia de la voladura, la fragmentación del material y el rendimiento de las etapas posteriores del ciclo de minado.

Durante décadas, las perforadoras convencionales han sido la herramienta principal en esta fase. Sin embargo, dicha operación expone directamente al personal técnico asignado a riesgos en el campo, además origina defectos técnicos como la variabilidad en la precisión de los taladros y altos costos operativos basados en el consumo de combustible y la disponibilidad de los equipos

Las innovaciones tecnológicas implementadas en los últimos años han dado paso al desarrollo de sistemas de perforación autónoma, los cuales se basan en la aplicación de sensores de alta precisión, navegación asistida por GPS y monitoreo remoto. La innovación y la tecnología aplicada busca reducir la exposición del operador a riesgos técnicos y operacionales en el desarrollo de taladros de las mallas de perforación, mejorando la eficiencia, los costos operativos y la seguridad.

Pese a que estas tecnologías están disponibles y se están poniendo en práctica en nuestro país. La adopción de dichas propuestas sigue siendo limitada, actualmente en diferentes empresas mineras sus áreas de perforación se encuentran en un proceso de evaluación y revisión de su eficacia a partir de parámetros comparativos, otro factor determinante son las condiciones geológicas y operativas pues en algunos casos se requiere tomar consideraciones adicionales en las organizaciones de cada operación minera

Por lo tanto, el plan de tesis propone un análisis minucioso que permita evaluar, con datos verificables y objetivos, el impacto que provoca la transformación de una perforación autónoma a una perforación convencional en una mina superficial ubicada en el sur del Perú. El análisis será desarrollado desde un punto de vista técnico, operativo, económico y humano, con el objetivo de proporcionar información que sea útil para la toma de decisiones ya que la perforación es uno de los procedimientos operativos más relevantes en la minería superficial.

Históricamente, este trabajo se ha llevado a cabo con perforadoras convencionales bajo procedimientos y consideraciones operativas preestablecidas en donde la ejecución de dichas tareas generaba accidentes por la exposición a peligros operacionales, fluctuaciones en la calidad en el desarrollo de los taladros y altos costos operativos relacionados con el consumo de combustible y las horas-hombre empleadas.

En la actualidad, múltiples operaciones mineras en el país han comenzado a contemplar la incorporación progresiva de sistemas de perforación autónomos que emplean algoritmos de optimización, navegación asistida, sensores exactos y sistemas de control a distancia. Esta tecnología tiene como propósito elevar la precisión de las perforaciones, mejorar el rendimiento en términos operativos y reducir la exposición del personal a incidentes y/o accidentes

No obstante, su aplicación en las minas de Perú aún está en un estado inicial y necesita de pruebas y monitoreos constantes para poder evaluar el desempeño y la eficiencia mostrada con respecto a los sistemas tradicionales. Por lo tanto, el proyecto de tesis que se presenta propone un estudio objetivo sobre la transición de perforación convencional a la perforación autónoma en una mina superficial situada en el sur del Perú, para tal propósito se evaluará sus efectos en los ámbitos técnicos, humanos, operativos y financieros a través de indicadores cuantitativos susceptibles de verificación.



CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

La presente investigación se llevó a cabo en una mina modelo situada en el sur del Perú, donde la aplicación de sistemas de perforación convencionales mostró varios inconvenientes

En el desarrollo del análisis se logró identificar los siguientes problemas:

Inexactitud en los taladros, las desviaciones constantes en el diseño y desarrollo de la malla pone en riesgo la calidad de la voladura y la posterior fragmentación del material.

La dependencia de los operadores, por la habilidad, la experiencia y el estado físico, así como de las condiciones litológicas y ambientales cambiantes, ocasionan problemas que impactan en el rendimiento y en el aumento de los periodos improductivos originando un mayor riesgo de incidentes y accidentes.

Gastos de operación altos, debido al incremento en el consumo de combustible y el mayor deterioro de partes y componentes de los equipos, lo que origina una menor disponibilidad de los equipos.

Alta exposición del personal a riesgos laborales, que incluye exposición a factores físicos como vibraciones, ruido, proyección de partículas y peligros relacionados con el desarrollo de tareas planificadas y maniobras ejecutadas en el campo, lo que incrementa las horas-hombre expuestas y, por lo tanto, la posibilidad de que ocurran accidentes.

La perforación autónoma se presenta como una opción tecnológica alentadora ante estas restricciones, puesto que su sistema incluye elementos tecnológicos como automatización de procedimientos críticos, control remoto y sistemas de navegación precisa. Esta tecnología, debido

a sus características, colabora con la seguridad del personal y brinda posibles mejoras en eficacia operativa, precisión y reducción de costos.

No obstante, debido a la considerable inversión que se necesita para su implementación y adaptación, es importante tener evidencia empírica objetiva y actualizada que permita valorar cuantitativamente sus auténticas contribuciones, ventajas y eventuales restricciones en el sector específico de las operaciones mineras.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el proceso de transición tecnológica de la perforación convencional a la perforación autónoma, mediante el análisis comparativo de indicadores clave de desempeño (KPIs) técnicos, operativos, económicos y de seguridad.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar la calidad y precisión de los taladros realizados con equipos convencionales y autónomos, considerando los indicadores de desviación en profundidad, desviación lateral, rectitud del pozo y variabilidad entre pozos.
- Analizar la eficacia operativa de ambos sistemas, evaluando la disponibilidad operativa, el tiempo de ciclo y la tasa de penetración.
- Evaluar los costos operacionales asociados a cada sistema de perforación, considerando el costo por metro perforado y el costo por hora de operación.

- Determinar el impacto de la perforación autónoma en la seguridad laboral, mediante la reducción de horas-hombre expuestas, la disminución de incidentes reportados y el cumplimiento de los protocolos de seguridad.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿En qué medida la transición tecnológica de la perforación convencional a la perforación autónoma impacta los indicadores clave de desempeño (KPIs) técnicos, operativos, económicos y de seguridad?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿En qué medida la perforación autónoma mejora la calidad y precisión de los taladros en comparación con la perforación convencional?
- ¿Cómo impacta la implementación de la perforación autónoma en la eficacia operativa del equipo?
- ¿En qué grado la perforación autónoma reduce los costos operacionales en comparación con el sistema convencional?
- ¿Qué impacto genera la transición a la perforación autónoma en la seguridad laboral, particularmente en la reducción de horas-hombre expuestas y en la disminución de incidentes reportados?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

De acuerdo con la investigación, corresponde a optimización de procesos mineros.

1.5 Palabra clave

- Perforación autónoma
- Perforación convencional
- Seguridad laboral
- KPIs

1.6 Justificación e importancia

En el Perú, existen varias unidades mineras que continúan trabajando con perforadoras convencionales, lo cual genera expectativas con respecto a la implementación de procesos autónomos debido a los posibles beneficios que su implementación podría generar como por ejemplo mejora en el rendimiento operacional, mejora en los costos de inversión, mejora en la seguridad y mayor y mejor desempeño en el desarrollo técnico de la perforación.

No obstante, para tomar decisiones más acertadas, es importante desarrollar una evaluación exhaustiva y cuantitativa.

La presente investigación tiene como objetivo analizar los factores determinantes en el cambio tecnológico de la perforación convencional a la perforación autónoma en una mina superficial del sur de Perú, considerando cuatro aspectos fundamentales:

- Método: Al examinar la exactitud y la calidad de los taladros en el desarrollo de una malla de perforación, se puede establecer si la perforación autónoma garantiza resultados superiores.

- Operaciones: Se validará la autonomía una vez que se cuantifiquen los tiempos de ciclo y la disponibilidad de los equipos.
- Económica: Al analizar los costos operativos, se evaluará si la perforación autónoma es una alternativa rentable y sostenible.
- Humana: Al examinar el desempeño de los trabajadores y su exposición frente a los peligros se determinará si la perforación autónoma contribuye o no con la seguridad laboral

El desarrollo del presente trabajo de investigación proporcionará información cuantitativa verificable que permitirá a las empresas mineras tomar decisiones estratégicas en función de la implementación de perforadoras autónomas.

El incluir indicadores económicos, técnicos, operativos y humanos en un análisis comparativo contribuirá al conocimiento técnico, operativo cuya aplicación brindará un aporte metodológico para validar replica en otras operaciones mineras del país.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

La implementación de procesos de perforación automatizado en el sector minero ha generado mucho interés, es por ello por lo que, la evaluación de desempeño entre una perforadora convencional y una perforadora autónoma se ha convertido en un análisis obligatorio sobre todo en operaciones mineras superficiales. A escala global, varios estudios han examinado la manera en que estas tecnologías aumentan la precisión de los taladros, garantizan la continuidad operacional y protegen al personal. Uno de los hallazgos más consistentes es el que presentan Li, Liu y Zhang (2023), quienes sostuvieron que los sistemas autónomos de perforación, debido a sus algoritmos de corrección en tiempo real y sus sensores de alta precisión, tienen desviaciones notoriamente menores que los equipos convencionales.

McCarthy, Evans y Howard (2022), por otro lado, investigaron el impacto de la automatización en la duración de los ciclos. Ellos demostraron que la perforación autónoma crea operaciones más estables al suprimir las interrupciones vinculadas a la fatiga humana, lo cual se traduce en un aumento de la productividad diaria. Estos hallazgos concuerdan con el estudio de Schunnesson y Kristoffersson (2021), quienes descubrieron que los equipos autónomos favorecen y brindar una mejor disponibilidad mecánica al disminuir maniobras repetitivas del operador.

Además, la literatura reciente enfatiza el efecto que tiene la automatización en la seguridad. Morales, Rojas y Pinto (2023) llevaron a cabo una investigación en operaciones andinas y encontraron que la reducción de la presencia física del personal en áreas de perforación disminuyó los incidentes. Simultáneamente, la tendencia mundial indica que las operaciones remotas son

parte de los estándares de minería segura del futuro, según lo destaca la International Council on Mining and Metals (ICMM, 2021).

Epiroc (2022) documentó desde una perspectiva tecnológica las experiencias de implementación en Perú, subrayando que los beneficios encontrados en las minas que han adoptado perforadoras autónomas durante sus fases iniciales de operación incluyen una disminución de la exposición humana sumada a un monitoreo y control constante de los parámetros y precisión en la perforación minera.

Nikolakopoulos, G., Koval, A., Fumagalli, M., Konieczna-Fuławka, M., Santas Moreu, L., Vigara-Puche, V., Verma, K., de Waard, B., & Deutsch, R. (2025). *Autonomous drilling and the idea of next-generation deep mineral exploration*. Sensors, 25(13), 3953

Nikolakopoulos et al. (2025) Desarrollo un trabajo de investigación revisando los procesos de perforación autónoma orientada a la búsqueda de minerales, en dicho proceso utilizo modelos predictivos basando su toma de decisiones al uso de sistemas de inteligencia artificial. Además, en el estudio se muestra el paso a paso de cómo se realiza la supervisión en tiempo real considerando para ello las presiones, toque, metros perforados entre otros lineamientos técnicos, además se sumo un sistema de modelado en tres dimensiones. Los sistemas tecnológicos empleados permitieron ajustar automáticamente distintos parámetros operativos con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir las fallas en la operación. Otro aporte fue la reducción de desviaciones y sobre todo el cuidado del operador ya que no era necesaria la presencia directa del operador. Los investigadores además descubrieron algunas limitaciones por ejemplo las limitaciones técnicas desde el fabricante y la importancia de los factores regulatorios y protocolos de seguridad que se tienen que considerar en el proceso de operaciones mina. Finalmente, el trabajo de investigación permite realizar una revisión tecnológica y evaluación de sistemas modelo para realizar las réplicas necesarias

Anglo American Quellaveco (2023). *Perforadoras autónomas: implementación y resultados en Quellaveco.*

La incorporación de perforadoras autónomas en la empresa minera Quellaveco documentada por Anglo American, así como sus reportes de desempeño en el proyecto, permiten evaluar un caso práctico nacional de incorporación tecnológica. En Quellaveco se usan en operaciones mina equipos Pit Viper 351 (Epiroc) de modo autónomo y semiautónomo esto durante las etapas previas a la voladura. El proceso de perforación permitió revisar los parámetros de perforación y minimizar la exposición directa de los técnicos operadores en labores de alto riesgo. Los documentos y notas técnicas del proyecto mencionan múltiples beneficios operativos dentro de los que desatacan mayor precisión en la ubicación y mejor desempeño técnico en la perforación

Además, la mina en donde se desarrolla el proceso de investigación se ha planteado en su visión ser una mina 100% digital, con puntos de control remotos que fusionan la telemetría y los análisis de datos, ambos elementos facilitan la gestión operativa de las flotas, así como la reducción de horas-hombre expuestas.

Finalmente, los reportes corporativos señalan muestran que dentro de sus principales retos son la inversión inicial elevada, el requerimiento para la capacitación técnica avanzada del personal y de la adaptación de protocolos de mantenimiento y ciberseguridad para operar flotas digitales. Este antecedente es crucial para el estado del arte porque proporciona evidencia empírica peruana reciente sobre los efectos operativos, económicos y de seguridad en una gran operación.

Cerro Verde S.A.A. (2022). *Reporte de sostenibilidad y seguridad operacional 2022*

El último reporte de sostenibilidad de Cerro Verde publicado en el portal transparencia en el año 2022 constituye un antecedente nacional que contribuye a la visión de la implementación de e incorporación de tecnologías digitales y procesos de gestión para mejorar el desempeño técnico y la seguridad en actividades de perforación. El informe muestra mejores resultados en la capacitación, en el desarrollo de protocolos de seguridad y en la incorporación de soluciones de monitoreo que permiten supervisar parámetros operativos en tiempo real, dichos aportes reducen la probabilidad de incidentes y promueven una gestión preventiva y eficaz. En el aspecto técnico se brinda información referida a la optimización de tiempos de ciclo y reducción de emisiones, así como consumo energético la incorporación de prácticas de mantenimiento predictivo y el monitoreo permanente de los equipos; son procesos que usualmente se realizan en los métodos convencionales. No obstante, el uso de plataformas digitales son una herramienta importante en la automatización ya que dicho sistema permite reducir la exposición directa del personal en zonas críticas mejora el desempeño de los equipos. El trabajo de investigación también muestra algunas limitaciones y desafíos dentro de los que destaca los cambios múltiples en cuanto a la actualización de los sistemas automatizados. Por otro lado, se debe considerar que la inversión en un proceso automatizado requiere grandes inversiones no solo para la adquisición de los equipos o la adaptación de la maquinaria a nuevos procesos y sistemas, sino que además se debe considerar una inversión constante en proceso de capacitación y entrenamiento considerando nuevos roles para nuevos procesos. Estudios comparativos realizados brindan aportes sobre la gestión de seguridad y gestión operacional lo que permite realizar un proceso de análisis y retroalimentación continua.

San Martín Vives, G. E. (2023). *Evaluación técnico-económica de un caso de estudio de perforadoras autónomas*. Universidad Técnica Federico Santa María

El trabajo de investigación de San Martín Vives (2023) brinda un estudio técnico y económico basado en los resultados de la incorporación de perforadoras autónomas, para ello también realizada cálculos de flujos financieros y estima la reducción de costos por desgaste de brocas y combustible evaluando el impacto en los aspectos técnicos del proceso de perforación convencional versus el proceso de perforación autónomo. El autor además, realiza un estudio detallado considerando distintos escenarios operativos para la revisión del desempeño de perforadoras convencionales versus las perforadoras autónomas. También se realizar la proyección con respecto al retorno de inversión y tasas de recuperación bajo escenarios que además simule el desempeño de acuerdo con horas técnicas operativas.

Con respecto a la metodología, en dicho trabajo de investigación se consideraron variables operativas tales como el desgaste del equipo, consumos de combustibles, tasas técnicas de perforación, factores humanos tales como procesos de capacitación, adaptación y mínimo tiempo expuesto a riesgos. También se consideraron aspectos referidos a los costos indirectos tales como el mantenimiento y la logística de los procesos. Los resultados más destacados demostraron que aun cuando el CAPEX de la automatización sea alto, la economía de operaciones recibe beneficios a mediano plazo por su reducción de OPEX y mejora el desempeño técnico que se traduce en menores costos por fragmentación ineficiente. El trabajo de investigación evalúa riesgos asociados a la adopción e incorporación de nuevos factores tecnológicos. Lo que posiciona a este trabajo de investigación como una herramienta de revisión ya que combina modelación económica con evidencia técnica aplicada, útil para justificar el análisis costo-beneficio en contextos andinos y latinoamericanos.

Perforación autónoma: una nueva era tecnológica en la minería de Perú y Chile”
Revista Minería (artículo técnico-científico / 2024).

El artículo de investigación publicado en Revista Minería en la división de edición técnico-científica presenta un trabajo aplicado sobre la incorporación de perforadoras autónomas a la minería de Perú y Chile, además muestra beneficios en seguridad y demuestra mayor eficiencia.

El texto destaca aspectos prácticos tales como la precisión de los barrenos, la reducción de horas-hombre en frentes peligrosos y la reducción de variabilidad que mejora la ruptura del mineral, así como su impacto en las unidades productivas posteriores tales como el carguío y el acarreo. Además, incluye información recolectada desde entrevistas con los supervisores y especialistas técnicos en operaciones quienes indican que la transición tecnológica obliga a realizar múltiples cambios no sólo en los aspectos técnicos y operativos, sino que además en la gestión de mantenimiento. El artículo destaca lo importante de la incorporación de políticas locales que permitan la transferencia tecnológica y la formación técnica.

2.1.1 Antecedentes de la investigación

Una de las obras más importantes es la de Quispe Pérez y Santillán (2024), que analizó la implementación de perforadoras autónomas en las minas del sur del Perú, mostrando progresos significativos en términos de eficiencia energética y reducción de los costos operativos.

Pereda Solórzano (2024) utilizó instrumentos analíticos, como Power BI, y parámetros de rendimiento para analizar la productividad de la perforación y voladura en una unidad minera de Perú.

Su investigación determinó que la automatización disminuye el tiempo improductivo y favorece la continuidad de las operaciones. Además, los estudios de la Universidad Nacional de

Ingeniería (Huarcaya & Rivas, 2022) revelaron que la precisión de los taladros en sistemas autónomos optimiza significativamente la fragmentación, lo cual beneficia el desempeño del carguío y acarreo.

Un informe de la empresa Komatsu (2021), es otro antecedente relevante, en el cual se examinaron pruebas piloto en minas de Sudamérica mediante el uso de perforadoras autónomas de última tecnología. El documento reveló que la estabilidad operativa había mejorado y que se había reducido significativamente el uso de combustible por metro perforado.

Finalmente, estudios regionales, por ejemplo, el de Contreras y Hidalgo (2020) en Chile, sostienen que la automatización de la perforación no solo mejora la productividad, sino también la previsibilidad operativa; esto tiene un impacto positivo en la planificación minera.

2.1.2 Antecedentes de la investigación internacionales

Los procesos operativos mineros día a día vienen reestructurando y mejorando sus procesos lo que lleva a la incorporación de un sistema tecnológico rumbo hacia la automatización sobre todo en la perforación en minas superficiales. Desde el año 2023, empresas mineras como Quellaveco y Antapaccay han incorporado en sus operaciones perforadoras autónomas de última generación, tal como la Pit Viper 351 de la empresa Epiroc, dicho equipo tiene la capacidad de operar con sistemas de control remoto y cuenta con la aplicación de algoritmos de en tiempo real.

La incorporación de estas nuevas tecnologías surge con la clara intención de mejorar la producción, reducir los costos operativos y, sobre todo, mejorar el desempeño con respecto a la seguridad laboral al disminuir la exposición directa de los trabajadores a ambientes de riesgo (Quispe Pérez et al., 2024).

La aplicación de dicho proceso ha demostrado que la perforación autónoma contribuye con la continuidad operativa pese a condiciones extremas tanto ambientales como laborales, lo que resulta en un mayor y mejor desempeño, así como una continuidad en la producción.

La reducción en la exposición de los trabajadores a agentes físicos directos incide positivamente en la conservación de la seguridad y salud ocupacional, contribuyendo de esta manera con el compromiso y cumplimiento asumido con estándares internacionales de seguridad ocupacional y con la normativa peruana vigente en materia de salud y seguridad en el trabajo (Ministerio de Energía y Minas, 2025).

En el plano económico, el *Anuario Minero 2024* reporta que la inversión minera alcanzó los US\$ 5,002 millones, monto predestinado a la mejora de la infraestructura y modernización tecnológica. El compromiso con la mejora continua establecido entre las diversas empresas mineras con las tecnologías emergentes permiten la integración de equipos y maquinaria tal como se ha realizado con las perforadoras autónoma, lo que representa un aspecto significativo con la estrategia nacional y contribución con la sostenibilidad y competitividad minera (ProActivo, 2025).

En conclusión, el proceso de transformación de la perforación convencional a la perforación autónoma en minas superficiales del sur del Perú ha marcado un hito tecnológico que reestructura y optimiza los procesos productivos, contribuyendo significativamente con la seguridad laboral y la innovación minera.

Nikolakopoulos et al. (2025) desarrollo un trabajo de investigación enfocando su tema en el diseño y revisión de los sistemas de perforación autónoma para la búsqueda de minerales, en dicho trabajo resalto también la necesidad de integrar sistemas y plataformas de monitoreo, además

para ello considero la importancia de incorporar sensores precisos y algoritmos inteligentes, la combinación de todos los elementos permitirán un mejor desempeño y por consiguiente una mayor calidad del proceso de perforación.

Dicho estudio también indico que el trabajo autónomo también requería la incorporación de soluciones tecnológicas que brinden el soporte necesario y suficiente para los operadores y por consiguiente para los resultados esperados en términos de producción y de seguridad y costos operativos. Los autores también mencionan cómo la autonomía brinda un mayor y mejor panorama acerca de la predicción de los procesos y en algunos casos aporta con la predicción del comportamiento geo mecánico del macizo rocoso, lo que incrementa los estándares de seguridad del personal. La consideración del presente antecedente constituye un aspecto importante ya que evalúan los beneficios, desafíos y oportunidades del proceso de inclusión de sistemas autónomos en operaciones mineras.

San Martín Vives (2023) El autor, desarrollo un análisis técnico-económico de múltiples casos reales que consideraron el proceso de incorporación de perforadoras autónomas en operaciones mineras, también el autor evaluó la productividad, la reducción de tiempos de ciclo y por consiguiente la mejora en los costos operativos y reducción de errores técnicos en la perforación. El autor también demostró que el empleo de equipos autónomos no solo mejora los aspectos técnicos operativos, sino que también reduce significativamente los tiempos de producción cero frecuentemente asociados a maniobras repetitivas, errores humanos o condiciones adversas del entorno.

La evidencia de los aportes de la automatización se enfoca sobre todo en la reducción de riesgos laborales debido a que la presencia del operador ya no es requerida en este aspecto el enfoque económico. Este antecedente es vital para los países latinoamericanos ya que muestra que

la adopción de tecnología autónoma en minería puede constituirse como un modelo de réplica en distintos lugares de la industria minera.

Häkkinen (2020) muestra una visión de la gestión de la seguridad en las operaciones mineras en el mundo. Dicho proceso y trabajo de investigación también considera en los análisis de datos los factores organizacionales, tecnológicos y humanos que repercuten sobre los niveles de riesgo.

En Australia, BHP y Rio Tinto implementaron flotas de perforadoras autónomas en Pilbara, su incorporación en los procesos operativos permitió mejoras de hasta 15% en productividad y 5% reducciones significativas en incidentes de seguridad.

De la misma manera en Canadá en Goldcorp se incorporaron sistemas autónomos en minas subterráneas, resaltando la compatibilidad con estándares de sostenibilidad y reducción de generación de impactos físicos, químicos, ergonómicos, etc.

Con la incorporación de dichos procesos, la empresa minera Quellaveco ubicada en la provincia de Moquegua, se ha posicionado como un líder pionero al introducir perforadoras autónomas en Perú. Dicha incorporación ha sido posible con el apoyo y soporte de Anglo American, EPIROC y Caterpillar.

Actualmente empresas mineras como Cerro Verde ubicada en Arequipa se vienen desarrollando pruebas experimentales con equipos autónomos bajo el soporte y coordinación con proveedores internacionales.

La empresa minera Antamina, así como Las Bambas vienen revisando la incorporación de sistemas de monitoreo remoto, autónomo y revisando los costos para evaluar la viabilidad de su implementación.

Los antecedentes evidencian que las operaciones mineras que actualmente se vienen desarrollando en el Perú están en una fase de implementación y transición, con la incorporación de proyectos que buscan mejorar el desempeño, la eficiencia y la seguridad.

La presente investigación también brindo un aporte a la seguridad industrial. El autor también sustenta la importancia de la aplicación de tecnologías emergentes y bases de datos que van de la mano de los sistemas autónomos, contribuyendo de esa manera a la adaptación de ambientes laborales seguros.

Este antecedente aporta con una evidencia documental sólida que permite comprender cómo la automatización y la digitalización pueden incorporarse en programas y procesos operativos mineros y cómo estas tecnologías construyen y proponen el desarrollo de un sistema operativos eficiente y seguro.

Wu, Fang y Li (2018) idearon un modelo "capacidad-comportamiento-desempeño" para examinar la seguridad de los equipos de ingeniería. Estos investigadores determinaron que las capacidades individuales, el respaldo por parte de la organización y la disponibilidad de tecnologías modernas impactan directamente en cómo los empleados perciben los riesgos y realizan sus labores. La investigación demuestra que el rendimiento en seguridad no solo depende de la capacitación convencional, sino también de la combinación entre competencias, condiciones de trabajo, liderazgo en seguridad y herramientas tecnológicas que ayudan a controlar los riesgos. Los escritores enfatizan que el uso de plataformas digitales y sistemas automatizados para comunicarse mejora la coordinación del equipo, disminuye los errores humanos y fortalece el ambiente de seguridad. Dado que subraya la importancia de complementar la automatización con elementos humanos y organizacionales, este precedente es significativo para los estudios en

minería, sobre todo en situaciones en las que el uso de perforación autónoma demanda nuevas competencias, roles y maneras de trabajar.

Por último, Tsichla y Adam (2021) examinaron las tácticas de capacitación en seguridad minera y la percepción del riesgo con el empleo de realidad virtual, evidenciando que la simulación

inmersiva posibilita la recreación de ambientes peligrosos sin poner a los trabajadores en riesgo directo. Los escritores indican que estas experiencias virtuales incrementan la habilidad de los participantes para reconocer amenazas, reaccionar en situaciones de emergencia y tomar decisiones en contextos difíciles, lo cual mejora el rendimiento del aprendizaje en comparación con las formas tradicionales. Asimismo, el estudio enfatiza que la realidad virtual es una herramienta esencial para formar a los trabajadores en entornos mineros cada vez más automatizados, porque posibilita la capacitación en la interacción con sistemas complejos y equipos autónomos antes de trabajar en el terreno.

2.1.3 Antecedentes Nacionales

En Perú, en los últimos años, se ha consolidado el cambio hacia la perforación autónoma, sobre todo en las áreas del sur donde hay una gran densidad de operaciones mineras a gran escala. Históricamente, el procedimiento más frecuente ha sido la perforación convencional. Este método se caracteriza porque depende del operario, tiene variaciones en la calidad de los taladros y exige que el personal esté directamente expuesto al frente minero. Sin embargo, el impulso para incrementar la productividad, la necesidad de reducir la variabilidad en las operaciones y el incremento de los niveles de seguridad han llevado a diversas empresas peruanas a estudiar e implementar sistemas autónomos y semiautónomos de perforación.

La experiencia documentada en la mina Quellaveco, que se considera el primer proyecto peruano en poner en práctica perforadoras autónomas como parte de su estrategia operativa, es uno de los antecedentes nacionales más significativos. Los reportes corporativos de Anglo American (2023) indican que al pasar a sistemas autónomos se logró mejorar la exactitud en la profundidad de los taladros, disminuir la desviación entre barrenos y optimizar el uso de herramientas de corte y energía. Los equipos autónomos lograron tasas de utilización superiores y un control más exacto de los parámetros de operación en comparación con la perforación tradicional. Esto tuvo un impacto positivo en la calidad de la voladura, al reducir los costos relacionados con una fragmentación inadecuada y la sobreperforación.

La operación de Cerro Verde, en Arequipa, ha registrado la inclusión gradual de sistemas digitales para el control de perforadoras, que combinan plataformas avanzadas y equipos convencionales para supervisar parámetros en tiempo real. Pese a que una parte significativa de la perforación convencional sigue siendo utilizada en la operación, los informes de sostenibilidad (Cerro Verde S.A.A., 2022) muestran avances importantes en cuanto a la formación digital del personal, la disminución de incidentes relacionados con contacto directo en áreas de perforación y el mejoramiento en los tiempos de ciclo por medio de sistemas tecnológicos.

Respecto a los costos operativos, varias minas del sur de Perú han determinado que los métodos tradicionales producen gastos extra vinculados con la variabilidad en la penetración debido a las diferencias en la destreza del operador, el desgaste rápido de brocas y los periodos inactivos relacionados con maniobras de rotación y posicionamiento del personal. Los informes analizados en proyectos de expansión (2019-2023) señalan que los sistemas autónomos disminuyen estos costos de manera considerable por medio de algoritmos que mantienen constantes los parámetros, lo cual mejora el uso del combustible y de las herramientas de

perforación y reduce las fallas operacionales. Estas observaciones a nivel nacional corroboran que el progreso en la perforación autónoma es una respuesta a un enfoque de competitividad y sostenibilidad económica en mercados internacionales que demandan una eficiencia superior.

Las regulaciones peruanas y los informes corporativos concuerdan en que la perforación convencional conlleva una alta exposición a riesgos críticos, tales como la vibración, el ruido, la proyección de partículas, la inestabilidad del terreno y el tránsito de maquinaria pesada. Por este motivo, operaciones en Junín, Moquegua y Arequipa han comenzado a implementar cabinas remotas, sistemas de monitoreo digital y procedimientos autónomos o semiautónomos con el fin de disminuir la presencia física del operador en áreas más peligrosas. Los resultados iniciales indican que se ha dado un descenso relevante en el número de horas-hombre expuestas, una probabilidad más baja de accidentes relacionados con la actividad minera y un avance en la cultura preventiva al mover las operaciones a centros de control más seguros.

Este progreso tecnológico fortalece la noción de que la perforación autónoma no solamente se basa en estándares de productividad, sino también en un compromiso cada vez mayor con la seguridad y el bienestar del trabajador peruano.

Por último, varias universidades y centros de investigación nacionales, entre ellos la Universidad Nacional de Ingeniería, la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa y la Pontificia Universidad Católica del Perú, han integrado en sus tesis e investigaciones temas vinculados con operaciones mineras eficientes, perforación y automatización. Estos estudios muestran el interés nacional en aumentar la comprensión y promoción de tecnologías que hagan posible una minería más segura, precisa y competitiva.

2.1.4 Antecedentes Locales

Rumbo Minero (2018) resalta la situación estratégica de Arequipa como uno de los centros más relevantes para el desarrollo minero nacional, subrayando su rol como anfitriona del PERUMIN, un evento minero clave en América Latina. El artículo destaca que, al transformarse la región en un centro de convergencia para la inversión en minería, el despliegue de tecnologías emergentes y la implementación de proyectos a gran escala, ha llamado la atención de la comunidad internacional. También destaca que las innovaciones tecnológicas expuestas en PERUMIN son un punto de referencia para compañías, instituciones y profesionales del sector, con lo cual el ecosistema de innovación minera del sur peruano se robustece.

En Perú, uno de los antecedentes más destacados es la puesta en marcha gradual de sistemas autónomos de perforación para operaciones mineras a gran escala del cobre en la región sur. A pesar de que la perforación convencional ha sido el método más común en minas de tajo abierto desde hace tiempo, varios informes técnicos internos de compañías mineras han registrado el cambio hacia tecnologías autónomas por los beneficios en términos de eficacia y precisión. Los ensayos preliminares realizados con equipos autónomos en zonas como Moquegua y Arequipa, donde se encuentran operaciones como Quellaveco y Cerro Verde, han evidenciado una disminución considerable de la variabilidad de los taladros. Esto resulta en una optimización de los factores de fragmentación, un control operativo más riguroso y menos sobreperforaciones.

Acosta Ale, Rodríguez Morante y Huanacuni Mamani (2011) realizan un estudio exhaustivo de la geología económica de Arequipa, resaltando la variedad de recursos minerales, las propiedades geológicas que predominan y el potencial de explotación. El informe de INGEMMET es un documento técnico esencial para entender las condiciones geológicas que afectan directamente la planificación minera, sobre todo en lo pertinente a la perforación y al

diseño de campañas exploratorias. La diversidad litológica y estructural de la zona, junto a su riqueza geológica, establece las necesidades técnicas para perforar e influye en el traspaso hacia tecnologías emergentes como los sistemas de perforación autónoma.

Desde un punto de vista operativo, las experiencias de supervisores y jefaturas de perforación en operaciones peruanas han indicado que la perforación convencional tiene más oscilaciones en la precisión del taladro por los siguientes motivos: el cansancio físico, la intervención directa del operador y la variabilidad en la experiencia técnica. En contraposición, los primeros ensayos con perforadoras autónomas en minas de Perú han evidenciado un avance significativo en la verticalidad, alineación y profundidad de los barrenos. Esto ha posibilitado llevar a cabo mallas de perforación con una desviación menor, lo cual tiene un impacto positivo tanto en la calidad de la voladura como en la eficiencia del carguío y el transporte. En minas situadas en zonas con mineralizaciones irregulares, este cambio operacional se ha notado especialmente; el control automatizado de parámetros posibilita disminuir errores en áreas geológicas muy diversas.

Aquí se expone un análisis minucioso de la planificación, los métodos y la ejecución de campañas de perforación, el cual se fundamenta en una tesis elaborada por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (2022). El objetivo del trabajo es geológico y se enfoca en desarrollar proyectos para realizar perforaciones diamantinas en esa zona. El informe revela el vínculo entre la actividad minera y el trabajo académico, pues expone las técnicas empleadas, las normativas de diseño y las metas logradas en la industria durante los trabajos de exploración minera. Asimismo, demuestra cómo el conocimiento generado en las universidades contribuye a la mejora de las competencias laborales y a la promoción de proyectos vinculados con la minería.

El informe corporativo de Anglo American Quellaveco (2023) representa uno de los primeros registros documentados en Perú sobre el uso de perforadoras autónomas, ubicando así al país dentro de la tendencia mundial hacia la automatización minera. El informe describe cómo la mina Quellaveco aplicó sistemas autónomos de perforación para elevar la precisión de los taladros, reducir el riesgo al que están expuestos los trabajadores y optimizar la eficiencia operacional mediante un control más frecuente de los parámetros técnicos. Además, muestra los beneficios logrados tras la implementación, como son: disminuir el tiempo improductivo, incrementar la seguridad laboral y añadir sistemas digitales para supervisar equipos a distancia.

En el sector de la seguridad, numerosos reportes corporativos de Perú han señalado que la perforación convencional pone a los operadores en riesgo debido al ruido, las vibraciones, el desplazamiento de equipos pesados, la proyección de partículas y las condiciones climáticas duras. La ley nacional requiere que se sigan rigurosos protocolos de seguridad en zonas de perforación, lo cual aumenta las horas-hombre en áreas críticas. Por el contrario, las operaciones piloto de perforación autónoma en minas peruanas han mostrado que el número de trabajadores expuestos directamente al frente del tajo ha disminuido significativamente, dado que los equipos tienen la capacidad de ser controlados a distancia desde centros de control. Esta modificación no solo minimiza las posibilidades de que ocurran incidentes vinculados con caídas, interacción con maquinaria o problemas en el terreno, sino que además robustece la cultura de prevención.

El informe anual de sostenibilidad de Cerro Verde S.A.A. (2022) incluye datos sobre el desempeño ambiental, la innovación tecnológica y la seguridad laboral, enfatizando las acciones adoptadas por la compañía para optimizar la eficacia operacional y minimizar los peligros en sus procedimientos de perforación. El informe revela que Cerro Verde ha implementado una variedad de protocolos preventivos, tecnologías actuales y sistemas de seguimiento que contribuyen a

disminuir los incidentes y mejorar la administración de sus operaciones. Estas mejoras incluyen el uso de herramientas digitales para supervisar las actividades, la adopción progresiva de tecnologías que fomentan operaciones más seguras y sostenibles, y la mejora de la capacitación del personal.

En conclusión, el modelo operacional más seguro, eficiente y sostenible en términos económicos se ha logrado mediante la transición hacia la mitad autónoma —modelos híbridos que permiten que un operador controle varias perforadoras desde una cabina remota—, como lo demuestra la experiencia obtenida en operaciones como Cerro Verde. Este enfoque ha hecho posible fusionar las habilidades del trabajador peruano con las capacidades de la tecnología actual. Estos antecedentes locales destacan la importancia de estudiar la perforación autónoma no solamente como un progreso tecnológico, sino también como una progresión natural de las actividades mineras en Perú hacia normas más elevadas de seguridad, reducción de la variabilidad operacional y optimización estratégica de costos.

2.2 Hipótesis general

Es posible que la implementación de la perforación autónoma en una mina superficial del sur del Perú genere un mejor desempeño en comparación con la perforación convencional.

2.2.1 Hipótesis específicas

H1: Es probable que la perforación autónoma desarrolle mayor cantidad de taladros con menor desviación en profundidad y desvíos laterales, mayor rectitud y menor variabilidad entre pozos en comparación con la perforación convencional

H2: Es probable que la perforación autónoma presente una mayor disponibilidad operativa y un menor tiempo de ciclo de operación, así como una mayor tasa de penetración que la perforación convencional

H3: Es probable que la perforación autónoma reduzca el costo por metro perforado y el costo por hora de operación en comparación con la perforación convencional

H4: Es probable que la perforación autónoma reduzca las horas-hombre expuestas y la tasa de incidentes reportados, mejorando el desempeño de los indicadores de seguridad laboral en comparación con los resultados de la perforación convencional

Las hipótesis planteadas someten a una verificación clara y consistente la misma que se puede demostrar mediante el análisis comparativo de los indicadores clave de desempeño (KPIs) definidos en la sección 3.6.3, utilizando datos recolectados en condiciones operativas equivalentes durante el año 2024.

2.3 Variables de la investigación

2.3.1 *Variable dependiente*

- Eficiencia operativa.
- Calidad del taladro.
- Costos operacionales.
- Seguridad laboral.

2.3.2 *Variable independiente*

- Nivel de automatización de la perforación.

Tabla 1*Operacionalización de las variables*

Tipo de variable	Variable	Indicadores	Subindicadores
Variable Independiente	Nivel de automatización de la perforación	- Proporción de equipos autónomos - Grado de autonomía funcional - Tiempo desde implementación	- % de equipos autónomos - Nivel de tareas automatizadas - N° de intervenciones humanas - Meses de operación autónoma
Variable Dependiente	Eficiencia operativa	- Tiempos de ciclo - Disponibilidad operativa - Productividad	- Minutos por ciclo - % de disponibilidad - Metros perforados/día
	Calidad del taladro	- Desviación del diseño - Tasa de retrabajo	- Desviación radial (mm) - Desviación en inclinación/azimut - % de taladros rectificados
	Costos operacionales	- Costo por metro perforado - Costo de mantenimiento	- S/ por metro - S/ por hora de operación
	Seguridad laboral	- Exposición del personal - Tasa de incidentes	- Horas-hombre expuestas - N.º incidentes por 1,000 hh

Nota. Tabla de variables de automatización de perforación.



3. Metodología

3.1 Tipo y nivel de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo aplicado, ya que busca resolver un problema concreto de la industria minera específicamente en las operaciones mineras tomando en cuenta el proceso de transición tecnológica. Asimismo, corresponde a un nivel explicativo-comparativo, ya que establece relaciones causales entre el nivel de automatización de la perforación (variable independiente) y sus efectos en los indicadores técnicos, operativos, económicos y de seguridad (variables dependientes). Este enfoque no solo describe las diferencias y aportes entre ambos sistemas, sino que además explica el por qué la perforación autónoma genera mejores resultados en una operación minera superficial.

3.2 Población

La población de estudio de la presente investigación está compuesta por equipos de perforación rotativa de superficie que operan en una mina a tajo abierto ubicada en la región sur del Perú, dicha mina se encuentra en proceso de migración tecnológica desde sistemas convencionales hacia sistemas autónomos.

3.3 Muestra

La muestra fue seleccionada intencionalmente y estuvo conformada por cuatro perforadoras: dos de tipo convencional (modelo Epiroc DM45) y dos de tipo autónomo (modelo Epiroc Pit Viper 351 equipadas con sistemas RCS y Mobius for Drills). Esta selección permitió realizar una comparación adecuada y equilibrada entre ambos sistemas, considerando condiciones operativas similares durante todo el periodo de estudio.

3.4 Alcances

El presente estudio se basa en el desarrollo de una evaluación comparativa del proceso de transición tecnológica entre la perforación convencional y la perforación autónoma en una mina superficial ubicada en el Sur del Perú. Los alcances son los siguientes:

- Se desarrolló una comparación directa y controlada entre dos perforadoras convencionales (modelo Epiroc DM45) y dos perforadoras autónomas (modelo Epiroc Pit Viper 351 con sistemas RCS y Mobius for Drills), operando bajo condiciones geológicas, operativas y ambientales similares.
- El análisis consideró cuatro ámbitos bien definidos y mencionados en los objetivos específicos: calidad y precisión de los taladros, eficacia operativa, costos operacionales y seguridad laboral, mediante el uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) cuantitativos.
- Los resultados obtenidos brindaron evidencia empírica actualizada que puede servir como referencia técnica para la toma de decisiones en otras operaciones mineras superficiales que se encuentren en proceso de implementación con tecnologías autónomas.
- El estudio se enfoca exclusivamente en la perforación rotativa de producción para mallas de voladura, sin incluir otros tipos de perforación tales como la perforación diamantina o perforación con equipos subterráneos.

Aunque el estudio fue diseñado y realizado considerando un proceso riguroso en la metodología, presenta las siguientes limitaciones:

- Los hallazgos se basan en una sola operación minera ubicada en la región Sur del Perú, por lo que los resultados pueden no ser totalmente representativos en todas las condiciones geológicas, litológicas y operativas presentes en las distintas operaciones mineras superficiales de nuestro país.
- La disponibilidad y la calidad de los registros operativos históricos y en tiempo real dependieron de los sistemas y reportes propios de la empresa, lo que de todas maneras influye en la profundidad del análisis.
- Los factores externos como variaciones litológicas inesperadas, condiciones climáticas adversas o cambios en la planificación minera durante el periodo de estudio, pudieron afectar parcialmente el desempeño de los equipos.
- El análisis se centró únicamente en la comparación entre la perforación convencional y la perforación autónoma, sin considerar otras tecnologías emergentes, por ejemplo, sistemas híbridos o inteligencia artificial avanzada, tampoco considero el impacto a largo plazo en las etapas downstream del ciclo minero.
- El tamaño de la muestra (cuatro perforadoras durante un periodo específico de evaluación) limita la posibilidad de realizar análisis estadísticos inferenciales más robustos. Pero por costos y restricciones operativas, así como la confidencialidad de datos de la empresa no es posible contar con más información.

Finalmente, las limitaciones mencionadas no invalidan los resultados obtenidos, ya que se aplicaron los controles adecuados y se utilizaron múltiples fuentes de datos para garantizar la validez del estudio.

3.5 Limitaciones

Aunque el estudio fue diseñado y realizado considerando un proceso riguroso en la metodología, presenta las siguientes limitaciones:

- Los hallazgos se basan en una sola operación minera ubicada en la región Sur del Perú, por lo que los resultados pueden no ser totalmente representativos en todas las condiciones geológicas, litológicas y operativas presentes en las distintas operaciones mineras superficiales de nuestro país.
- La disponibilidad y la calidad de los registros operativos históricos y en tiempo real dependieron de los sistemas y reportes propios de la empresa, lo que de todas maneras influye en la profundidad del análisis.
- Los factores externos como variaciones litológicas inesperadas, condiciones climáticas adversas o cambios en la planificación minera durante el periodo de estudio, pudieron afectar parcialmente el desempeño de los equipos.
- El análisis se centró únicamente en la comparación entre la perforación convencional y la perforación autónoma, sin considerar otras tecnologías emergentes, por ejemplo, sistemas híbridos o inteligencia artificial avanzada, tampoco considero el impacto a largo plazo en las etapas downstream del ciclo minero.
- El tamaño de la muestra (cuatro perforadoras durante un periodo específico de evaluación) limita la posibilidad de realizar análisis estadísticos inferenciales más robustos. Pero por costos y restricciones operativas, así como la confidencialidad de datos de la empresa no es posible contar con más información.

- Finalmente, las limitaciones mencionadas no invalidan los resultados obtenidos, ya que se aplicaron los controles adecuados y se utilizaron múltiples fuentes de datos para garantizar la validez del estudio.

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Con el propósito de obtener información confiable, verificable y directamente vinculada a los objetivos trazados en la investigación, se emplearon diversas técnicas e instrumentos de recolección de datos tanto cualitativos y cuantitativos. La aplicación de estos permitió capturar y evaluar de manera sistemática el desempeño de ambos sistemas de perforación.

Las técnicas utilizadas fueron:

- Observación directa en campo: Se documentaron los procedimientos operativos aplicados dentro de los que se consideraron los tiempos de ciclo, el número de maniobras y las condiciones de seguridad tanto en perforación convencional como autónoma.
- Análisis documental: Dicho proceso fue desarrollado tras un proceso de revisión de planes de perforación digital, registros de mantenimiento, fichas técnicas de los equipos e informes operativos generados por el área de supervisión a cargo.
- Evaluación comparativa de indicadores: Para este ítem se consideró la comparación de datos históricos y contemporáneos mediante el cálculo de KPIs previamente definidos, utilizando técnicas de análisis descriptivo y comparativo.

Los instrumentos de recolección de datos incluyeron:

- Fichas técnicas de los equipos de perforación (sección 3.7).

- Formatos estandarizados de registro de operación diaria (sección 3.8).
- Listas de verificación (checklists) de seguridad laboral (sección 3.11).
- Software especializado de monitoreo y control: Rig Control System (RCS Logs) y Mobius for Drills (sección 3.12).

Todos los datos recolectados fueron validados mediante triangulación de fuentes (registros manuales versus reportes digitales) y se registraron de forma sistemática durante el turno de día, garantizando la consistencia y la trazabilidad de la información.

3.6.1 Métodos para la recopilación de datos

- Observación directa en el lugar: Se documentaron los métodos de perforación ejecutados con herramientas autónomas y convencionales, examinando la seguridad, el tiempo del ciclo y la disponibilidad.
- Análisis de documentos: Se revisaron los planes de perforación, los registros de mantenimiento, las hojas técnicas de perforadoras y los informes operativos.
- Evaluación comparativa de indicadores operacionales: Se compararon datos históricos y contemporáneos de perforación convencional y autónoma, empleando técnicas estadísticas para determinar discrepancias importantes.

3.6.2 Herramientas de recolección de datos

- Fichas técnicas de herramientas de perforación, ya sean autónomas o convencionales.
- Formatos de registro de operaciones cotidianas (tiempos cíclicos, penetración, disponibilidad).

- Checklists de seguridad laboral.
- Software de monitoreo y control (RCS Logs, Mobius for Drills) para extraer datos reales de operación y desempeño).

3.6.3 Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)

Para realizar un análisis comparativo objetivo y cuantitativo entre la perforación convencional y la perforación autónoma, se definieron e implementaron un conjunto de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) alineados con los objetivos planteados en la investigación.

Los KPIs fueron seleccionados considerando las mejores prácticas aplicadas en la ingeniería de minas para operaciones de tajo abierto, su aplicación permite evaluar de manera integral los aspectos técnicos, operativos, económicos y de seguridad.

Los indicadores se clasificaron de la siguiente manera:

- KPIs Técnicos: En este ítem se consideran los siguientes puntos, desviación en profundidad (cm), la desviación lateral (cm), la rectitud del pozo (%), y la variabilidad entre pozos (cm). Estos indicadores miden la precisión y calidad de los taladros en relación con el diseño digital de la malla de perforación tal como se muestra en la Tablas 7, 8 y 9
- KPIs Operativos: En este aspecto considera la disponibilidad operativa (%), el tiempo de ciclo (min/pozo) y la tasa de penetración (m/h). Estos KPIs evalúan la continuidad, eficiencia y la productividad del equipo de perforación. Tablas 2,3,10,11 y 12

- KPIs Económicos: El costo por metro perforado (S/m) y costo por hora de operación (S/h). Estos indicadores permiten cuantificar la eficiencia económica de cada sistema. Tablas 13, 14 y 15
- KPIs de Seguridad: En este ítem se considera las Horas-hombre expuestas por turno, el número de incidentes reportados por turno y el cumplimiento de la lista de verificación (checklist) de seguridad laboral. Los indicadores mencionados miden el nivel de exposición del personal y la efectividad en los controles de riesgo. Tablas 5, 6, 16, 17, 18, 19 y 20.

La medición de estos KPIs se realizó de forma sistemática durante el periodo de estudio (agosto 2024), utilizando registros diarios de operación, reportes generados por los sistemas RCS Logs y Mobius for Drills, checklists estandarizados y mediciones directas en campo.

Todos los datos fueron validados cruzando información de fuentes primarias (formatos de registro) y secundarias (software de monitoreo).

La selección y operacionalización de estos KPIs responde a la necesidad de contar con sistemas de medición estandarizados que permitan no solo comparar ambos sistemas en condiciones equivalentes, sino también generar evidencia replicable para otras operaciones mineras superficiales del sur del Perú.

3.7 Ficha técnica de los equipos utilizados

Para garantizar la transparencia y reproducibilidad del estudio, se elaboraron fichas técnicas detalladas de los equipos de perforación evaluados. Estas fichas incluyen las principales especificaciones técnicas, así como las características operativas y sus correspondientes

parámetros de desempeño reportados por los fabricantes y complementadas con datos de operación reales obtenidos durante el periodo de estudio.

Ficha Técnica – Perforadora Convencional

Equipo: Perforadora rotativa de superficie Modelo Epiroc DM45 (Convencional)

Fabricante: Epiroc Tipo de operación: Manual / semiautomatizada

Tipo de operación: Manual / semiautomatizada

Características generales:

- Diámetro de perforación: 152 – 229 mm
- Profundidad máxima de perforación: 45 m
- Sistema de control: Hidráulico con asistencia manual
- Motor: Diésel, 600 HP
- Consumo de combustible: 95–98 L/h
- Cabina: Estándar, operador presente en campo

Desempeño operativo:

- Disponibilidad promedio: 85–88 %
- Tiempo de ciclo promedio: 42–45 min por pozo
- Penetración promedio: 26–29 m/h
- Precisión de taladro:
 - Desviación en profundidad: ~12 cm

- Desviación lateral: ~10 cm
- Rectitud promedio: 92 %
- Variabilidad entre pozos: 6–8 cm

Costos y mantenimiento:

- Costo por metro perforado: S/. 42–44
- Costo por hora de operación: S/. 1,250–1,320
- Mantenimiento preventivo mensual: S/. 18,500 – 18,900

Aplicaciones:

- Perforación en minas superficiales con operación convencional.
- Adecuada para mallas estándar de voladura, aunque presenta mayor variabilidad en precisión y tiempos de ciclo.

Figura 1

Perforadora rotativa de superficie Modelo Epiroc DM45 - Convencional



Nota. Perforadora rotativa Epiroc DM45.

La perforadora Atlas Copco DM45 está montada sobre orugas y tiene un sistema de accionamiento hidráulico en la parte superior. Está diseñada para la perforación de barrenos de producción hasta profundidades de 53,3 m (175 pies), utilizando un cambiador de tubos de perforación con una longitud de 9,1 m (30 pies) y un carrusel que incluye cinco barras. Robusta y altamente productiva, la DM45 se utiliza para la perforación de barrenos en todo tipo de operaciones mineras en todo el mundo. La presión de alimentación genera una fuerza de carga de la broca de hasta 200 kN y utiliza un motor diésel para impulsar el compresor de aire y el sistema

hidráulico. Existen diversas alternativas de compresores de baja y alta presión para la serie DM45, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones de perforación rotatoria y DTH.

La elevación de la torre con un conjunto completo de tubos de perforación en el carrusel y debajo del cabezal rotatorio se puede realizar en menos de un minuto. El cambiador de tubos de perforación tipo carrusel forma parte del conjunto de la torre y está ubicado en el exterior del bastidor. La fijación de la torre y el cambio de tuberías se realizan de forma remota desde la cabina del operador. La rotura de las juntas de las tuberías se realiza mediante una llave de horquilla deslizante hidráulica de impacto limitado, lo que minimiza las cargas de impacto en la torre, el carrusel, el cabezal rotatorio y los componentes de alimentación. Un motor hidráulico gira el carrusel para indexar el cabezal rotatorio y realizar el cambio. La rotación estándar en la DM45 se realiza mediante un cabezal superior rotatorio. Dos motores hidráulicos impulsan la rotación del cabezal. Un adaptador de husillo reemplazable de 29" entre el husillo y la tubería de perforación se incluye de serie, junto con guías de cabezal reemplazables.

Comodidad para el operador

Todas las funciones operativas se controlan desde la consola del perforador en la cabina. El operador disfruta de una excelente visibilidad con una vista sin obstáculos de la mesa de perforación. La consola de perforación envolvente facilita el acceso a los controladores eléctricos e hidráulicos de alta resistencia. La cabina está aislada térmicamente, presurizada, calefactada, ventilada y equipada con vidrios de seguridad tintados. Cuenta con un asiento ergonómico con cinturón de seguridad y se puede acceder a través de dos puertas abatibles con cerradura. La cabina con certificación FOPS cuenta con un sistema de aire acondicionado integrado y una reducción de ruido probada a 80 dBA. Un sistema de iluminación nocturna halógena de seis luces se incluye de serie para la visibilidad del operador en condiciones de poca luz.

Sistema de alimentación eficiente

El sistema de alimentación hidrostático de circuito cerrado DM45 está accionado por dos cilindros de alimentación hidráulicos que elevan y bajan el cabezal rotatorio de forma suave y segura mediante un cable para la bajada y una cadena de alimentación de alta resistencia para la retracción. Un manómetro en la consola del operador indica la presión de alimentación. Este control simplificado también proporciona velocidades de alimentación y retracción más rápidas. El sistema funciona con mayor eficiencia que otros diseños gracias a menores caudales y la consiguiente reducción de la caída de presión. Esto permite que las bombas operen en la parte más eficiente de sus curvas de rendimiento.

Plataforma móvil y estable

El DM45 utiliza un tren de rodaje tipo excavadora, construido según las especificaciones de Atlas Copco. Las orugas son accionadas por un sistema de engranajes planetarios y dos motores hidráulicos de 111 hp (83 kW) cada uno. El bastidor principal del DM45, diseñado por Atlas Copco, está fabricado con tubos rectangulares soldados, verificado mediante medición dinámica de la tensión. Un yugo oscilante de "viga móvil" permite que la plataforma se desplace sobre terrenos irregulares, a la vez que reduce las tensiones de torsión en el bastidor principal. Ambas orugas se controlan individualmente y funcionan como una unidad independiente. Las orugas son ajustables hidráulicamente mediante un sistema de resorte retráctil y están equipadas con zapatas de garra de triple barra reemplazables.

Ficha técnica – Perforadora Autónoma

Modelo: Epiroc Pit Viper 351 (Autónoma, con RCS y Mobius for Drills)

Tipo de equipo: Perforadora rotativa autónoma de superficie, control remoto/digital.

Características técnicas principales:

- Diámetro de perforación: 152 – 270 mm
- Profundidad máxima de perforación: 60 m
- Sistema de control: Mobius para perforadoras, sistema de navegación de agujeros, autodrill, sistema de control de la perforación (RCS)
- Consumo energético: 70–73 kWh/h (equivalente a 72 L/h diésel en operación híbrida)
- Disponibilidad promedio: 91–94 %
- Tiempo de ciclo promedio: 34–36 min por pozo
- Penetración promedio: 33–36 m/h
- Precisión de taladro: Desviación en profundidad ~5 cm; desviación lateral ~4 cm
- Rectitud promedio: 98 %
- Variabilidad entre pozos: 2–3 cm
- Mantenimiento preventivo mensual: S/. 15,000 – 15,300

Aplicaciones:

- Perforación autónoma en minas superficiales de gran escala.
- Optimizada para el desarrollo de mallas de voladura previamente diseñadas con alta precisión

- Reduce horas-hombre expuestas en campo y elimina tareas manuales críticas, mejorando la seguridad laboral.

Figura 2

Perforadora automatizada Modelo Pit Viper 351



Nota. Perforadora automatizada modelo Pit Viper 351

Perforación de alta eficiencia. La Pit Viper 351 es una de las perforadoras tricónicas rotativas más eficientes del mercado para perforar agujeros de 270 mm a 406 mm (10 5/8 pulg. a 16 pulg.) de diámetro. La Pit Viper 351 puede perforar agujeros limpios, ya sean angulares o verticales, hasta una profundidad de 19,8 m (65 pies) en una sola pasada, o hasta 41,1 m (135 pies) en aplicaciones de múltiples pasadas. La perforación en una sola pasada puede mejorar la eficiencia de perforación hasta en un 25 % al perforar en materiales blandos, eliminando el tiempo de cambio de varilla y permitiendo más tiempo para la perforación. La eliminación del cambio de varilla también reduce el riesgo de errores operativos.

Las fichas técnicas sirvieron como base para la selección de los equipos y permitieron contextualizar los resultados obtenidos en las tablas de registro diario (Tablas 2 y 3), reportes de resultados (Tablas 7 y 8) y comparativas (Tablas 9, 12, 15 y 20). Además, facilitaron la identificación de las diferencias tecnológicas que explican el mejor desempeño del sistema autónomo en los KPIs definidos.

Funcionamiento suave y larga vida útil

El sistema patentado de tensado automático del cable de la Pit Viper 351 garantiza una alineación precisa del cabezal, mejora la vida útil del cable y elimina el tiempo de inactividad de la perforadora para tensarlo. Este diseño permite una perforación más suave, lo que ayuda a prolongar la vida útil de la broca y del sistema de avance.

Amplia potencia para roca dura

Un cabezal rotatorio con un potente torque de hasta 19,000 ft-lb (25,760 Nm), una capacidad de compresor de hasta 3,800 cfm de aire y 125,000 lb (56,700 kg) de peso en la broca crean un sistema equilibrado y potente para perforar rápidamente roca dura.

3.8 Formatos de registro de operación diaria

Para la medición de tiempos de ciclo, penetración y disponibilidad se usaron formatos de registro de operaciones diarias para medir la eficiencia operativa de las perforadoras. Estos instrumentos posibilitaron que los tiempos del ciclo, la penetración promedio y la disponibilidad de los equipos se registraran sistemáticamente, distinguiendo entre perforación autónoma y convencional. Los supervisores de turno llenaron los formatos, y después se validaron con informes digitales del sistema Mobius for Drills y RCS Logs.

Tabla 2*Evaluación de tiempos, perforación y disponibilidad en perforación convencional*

Pozo	Tiempo de ciclo (min)	Penetración (m/h)	Disponibilidad (%)	Observaciones
C-1	42	28	87	Maniobras para nivelación
C-2	44	27	85	Retraso por causa de calibración hidráulica
C-3	41	29	88	Operación convencional
C-4	43	28	86	Vibración excesiva
C-5	45	26	84	Evaluación de seguridad
PROM	43	27.6	86	

Nota. Equipo usado para el registro de datos Epiroc DM45 (Convencional) Toma de datos:
12/08/2024 Turno: Día – Guardia 1

Promedios del turno

- Tiempo de ciclo: 43 min
- Profundidad de penetración: 27.6 m/h
- Disponibilidad: 86 %

Tabla 3*Evaluación de tiempos, perforación y disponibilidad en perforación autónoma*

Pozo	Tiempo de ciclo (min)	Penetración (m/h)	Disponibilidad (%)	Observaciones
A-1	35	34	92	Supervisión remota, operación normal
A-2	34	35	93	Operación continua, sin incidentes
A-3	36	33	91	Ajuste automático de parámetros
A-4	34	36	94	Operación normal
A-5	35	34	92	Supervisión remota, sin observaciones

Nota. Equipo utilizado para el registro de datos Epiroc Pit Viper 351 (Autónoma) Fecha: 12/08/2025 Turno: Día – Guardia 1

Promedios del turno

- Tiempo de ciclo: 34.8 min
- Penetración: 34.4 m/h
- Disponibilidad: 92.4 %

3.9 Proyecto de perforación digital

Se empleó un plan de perforación digital creado con un software especializado en navegación de pozos, (incorporado al Rig Control System RCS) para analizar la exactitud y calidad de los taladros. Gracias a este plan, se pudieron establecer coordenadas exactas para cada pozo, además de la profundidad deseada y el espaciamiento.

Esto dio como resultado una malla digital que sirvió de referencia para comparar los resultados alcanzados con perforadoras autónomas y convencionales. Formación de la malla digital.

- Área de prueba: 100 m × 100 m en banco de mina superficial.
- Número de pozos: 10 (5 pozos perforados con una perforadora convencional y 5 pozos perforados con un equipo autónomo).
- Espaciamiento entre pozos: 7 m × 7 m.
- Profundidad: 45 m.
- Diámetro de perforación: 200 mm.

Tabla 4*Coordenadas de referencia zona de prueba*

Pozo	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Profundidad objetivo (m)
P-1	10	10	45
P-2	17	10	45
P-3	24	10	45
P-4	10	17	45
P-5	17	17	45
P-6	24	17	45
P-7	10	24	45
P-8	17	24	45
P-9	24	24	45
P-10	31	24	45

Nota. Referencia de pruebas con coordenadas y profundidad.

3.10 Procedimiento de validación

Se realizó la propuesta del plan digital en el sistema de navegación de pozos (HNS). Cada perforadora realizó los taladros conforme a las profundidades y coordenadas establecidas. Las desviaciones laterales y de profundidad se calcularon en relación con el diseño digital. Se estimó la rectitud de cada pozo y las diferencias entre ellos.

3.11 Lista de verificación de seguridad laboral

Para verificar que la exposición se ha reducido y que los protocolos se han cumplido. Se pusieron en marcha listas estandarizadas para asegurar la seguridad en los trabajos de perforación convencional y autónoma, con el objetivo de comprobar que las horas-hombre en el terreno han disminuido y están relacionadas con la seguridad laboral. Estos instrumentos hicieron posible que

se documentaran los incidentes reportados en cada turno, la presentación del personal y el cumplimiento de protocolos.

Tabla 5
Checklist de seguridad laboral – Perforación Convencional

Ítem de verificación	Cumplimiento	Observaciones
Uso de EPP completo	Sí	Todos los operadores con EPP
Horas-hombre (campo)	22	Operadores presentes en nivelación y perforación
Tareas críticas	Sí	Nivelación, cambio de broca
Incidentes reportados	2	Golpe menor en manipulación de broca, retraso por vibración excesiva
Supervisión remota	No	Operación 100 % presencial

Nota. Registro de datos con la perforadora Epiroc DM45 (Convencional) Fecha: 12/08/2025. Turno: Día – Guardia 1

Resumen del turno:

- Horas-hombre expuestas: 21–23 (promedio 21.6)
- Incidentes: 1–2 por turno
- Actividades críticas: presentes en todos los turnos
- Formato aplicado – Perforación Autónoma

Tabla 6*Checklist de seguridad laboral – Perforación Autónoma*

Ítem de verificación	Cumplimiento	Observaciones
Uso de EPP completo	Sí	Personal de supervisión remota
Horas-hombre en campo	8	técnicos de inspección puntual
Tareas críticas realizadas manualmente	No	Eliminadas, reemplazadas por control digital
Incidentes reportados	0	Sin incidentes en el turno
Supervisión remota	Sí	Operación controlada desde centro digital

Nota. Datos registrados con el equipo Epiroc Pit Viper 351 (Autónoma) Fecha: 12/08/2025

Turno: Día – Guardia 1

Resumen del turno:

- Horas-hombre expuestas: 7–9 (promedio 7.8)
- Incidentes: 0 por turno
- Actividades críticas: eliminadas

3.12 Software de monitoreo y control

Para garantizar la trazabilidad y confiabilidad de los datos operativos, se emplearon los sistemas de control y monitoreo desarrollados por Epiroc con sistemas RCS Logs, Mobius for Drills para extraer datos de la operación y desempeño:

- RCS (Rig Control System) Logs, que registra parámetros de perforación en tiempo real.

- Mobius for Drills, un sistema de supervisión a distancia que combina la información sobre operaciones y disponibilidad de los equipos autónomos. Estos softwares posibilitaron la extracción de datos exactos acerca de la penetración, el ciclo de tiempos, las desviaciones de taladros, la disponibilidad y las horas-hombre expuestas; así se validaron los resultados consignados.



Figura 3

Reporte – RCS Logs (Rig Control System)

Código ^
RCS Logs – Reporte de perforación diaria
Pozo ID: A-1
Profundidad objetivo: 45.0 m
Profundidad real: 44.8 m
Desviación lateral: 4.6 cm
Tiempo de ciclo: 35 min
Penetración promedio: 34 m/h
Disponibilidad: 92 %
Incidentes: 0
Tiempo de ciclo: 35 min
Penetración promedio: 34 m/h
Disponibilidad: 92 %
Incidentes: 0
Pozo ID: A-2
Profundidad objetivo: 45.0 m
Profundidad real: 45.1 m
Desviación lateral: 3.1 cm
Tiempo de ciclo: 34 min
Penetración promedio: 35 m/h
Disponibilidad: 93 %
Incidentes: 0
Resumen del turno:
Promedio desviación profundidad: 5.3 cm
Promedio desviación lateral: 4.1 cm
Promedio tiempo de ciclo: 34.8 min
Promedio penetración: 34.4 m/h
Disponibilidad promedio: 92.4 %

Nota. Reporte de perforación diaria

- Equipo: Pit Viper 351 – Autónomo Fecha: 12/08/2025 Turno: Día – Guardia 1
- Pantalla de monitoreo:

- RCS Logs – Reporte de perforación diaria
- Equipo: Pit Viper 351
- Fecha 12/08/2024-Turno día

Figura 4

Reporte – Mobius for Drills

```
Código ^

Mobius for Drills - Dashboard
-----
Estado del equipo: Operando en modo autónomo
Taladros completados: 5
Tiempo promedio de ciclo: 34.8 min
Penetración promedio: 34.4 m/h
Disponibilidad: 92.4 %
Horas-hombre expuestas: 8
Incidentes reportados: 0
-----
Observaciones:
- Operación continua sin interrupciones
- Supervisión remota desde CIO (Centro Integrado de Operaciones)
- Parámetros ajustados automáticamente por sistema Hole Navigation
```

Nota. Centro de Control Digital – Supervisión remota Equipo: Pit Viper 351 – Autónomo

Fecha: 12/08/2025

Figura 5

Pantalla de monitoreo Mobius for Drills

```
Código ^

Mobius for Drills - Dashboard
-----
Estado del equipo: Operando en modo autónomo
Taladros completados: 5
Tiempo promedio de ciclo: 34.8 min
Penetración promedio: 34.4 m/h
Disponibilidad: 92.4 %
Horas-hombre expuestas: 8
Incidentes reportados: 0
-----
Observaciones:
- Operación continua sin interrupciones
- Supervisión remota desde CIO (Centro Integrado de Operaciones)
- Parámetros ajustados automáticamente por sistema Hole Navigation
```

Nota. Pantalla de monitoreo, estado del equipo, taladros completados, tiempo promedio por ciclo.

3.13 Proceso de implementación de procedimientos

3.13.1 Evaluación de la efectividad técnica

Para comenzar a poner en marcha los procedimientos y analizar la transición técnica de la perforación convencional a la autónoma, vamos a comparar la exactitud y calidad de los taladros hechos con equipos autónomos y convencionales en el área de estudio.

Tabla 7

Reporte de resultados de la perforadora convencional

Pozo	Desviación en profundidad (cm)	Desviación lateral (cm)	Rectitud del pozo (%)	Variabilidad entre pozos (cm)
C-1	13.2	11.1	90.7	7.5
C-2	10.1	8.4	93.6	6.1
C-3	12.7	9.9	92.9	5.7
C-4	15.1	12.3	90.9	8.8

Pozo	Desviación en profundidad (cm)	Desviación lateral (cm)	Rectitud del pozo (%)	Variabilidad entre pozos (cm)
C-5	12.0	10.6	94.0	6.9
PROM	12.6	10.5	92.4	7.0

Nota. Los resultados señalan que la perforación convencional tiene desviaciones promedio de más de 10 centímetros, tanto lateral como en profundidad, y una rectitud aproximada del 92 %. Esta variación muestra el impacto del trabajo humano en tareas esenciales como la nivelación y el control de parámetros, lo que hace que los datos se dispersen más y que la malla de perforación tenga una precisión limitada (Epiroc, 2023; Anglo American, 2022).

En la tabla también se puede visualizar los resultados promedio obtenidos con las perforadoras convencionales usadas como muestra, que actualmente se encuentran laborando en una mina superficial del sur del Perú. En la tabla se puede apreciar que, con una rectitud de aproximadamente el 92 %, las desviaciones laterales y en profundidad superan los 10 cm en promedio. Estos datos coinciden con investigaciones anteriores que indican que la perforación manual o semiautomática tiene una alineación de pozos menos precisa y más variable.

Esto se debe principalmente a que a partir de la presencia e intervención del operador en tareas críticas como la nivelación y el control de parámetros de perforación, incrementa la dispersión de resultados y la probabilidad de errores acumulativos.

Tabla 8*Reporte de resultados de la perforadora autónoma*

Pozo	Desviación en profundidad (cm)	Desviación lateral (cm)	Rectitud del pozo (%)	Variabilidad entre pozos (cm)
A-1	5.8	4.6	98.3	2.3
A-2	4.4	3.1	99.6	1.7
A-3	5.1	4.2	97.6	2.0
A-4	6.6	4.9	97.5	2.6
A-5	4.8	3.9	98.8	2.1
PROM	5.3	4.1	98.4	2.1

Nota. Los datos indican que la perforación autónoma disminuye de manera considerable los desvíos, logrando profundidades medias de 5 cm y laterales de 4 cm, con una rectitud superior al 98 %. El empleo de sistemas digitales de control (RCS, Autodrill), que garantizan la repetibilidad y exactitud en la ejecución, es el responsable de la menor variabilidad entre pozos (Epiroc, 2023; Cacciuttolo et al., 2024).

Los hallazgos de la tabla antes mencionada fueron logrados con perforadoras autónomas Epiroc (PV-351 y SRD65) que contaban con sistemas de control, RCS y Autodrill. Se observa una disminución notable en las desviaciones, con promedios de 5 cm en profundidad y 4 cm en lateral, y un nivel de rectitud mayor al 98 %.

Tabla 9*Comparación de promedios de perforadora convencional vs perforadora autónoma*

Indicador	Promedio P. Convencional	Promedio P. Autónoma	Mejora atribuible a automatización
Desviación en profundidad (cm)	12.6	5.3	-57.9 %
Desviación lateral (cm)	10.5	4.1	-61.0 %
Rectitud del pozo (%)	92.4	98.4	+6. 6 puntos porcentuales
Variabilidad entre pozos (cm)	7.0	2.1	-70.0 %

Nota. La comparación entre los dos sistemas muestra que la precisión aumentó más del 55%, la variabilidad disminuyó en un 70% y hubo un aumento de seis puntos porcentuales en rectitud. Estos resultados confirman la hipótesis de que la perforación autónoma mejora la eficacia operativa y el nivel de calidad de los taladros, lo que a su vez favorece operaciones más seguras y productivas en minería superficial (Anglo American, 2022; Kumar et al., 2023).

El sistema autónomo presenta una mayor precisión y un desempeño más uniforme, en línea con los propósitos de elevar la calidad del taladro y la seguridad mediante la disminución de retrabajos y exposición en campo.

Los resultados comparativos entre perforación autónoma y convencional se resumen en la tabla. Hay una disminución del 70 % en la variabilidad entre pozos, un aumento de 6 puntos porcentuales en rectitud y un incremento superior al 55 % en precisión lateral y de profundidad. Estos resultados corroboran la hipótesis de que la perforación autónoma incrementa tanto la calidad de los taladros como la eficiencia operativa, a la vez que disminuye el riesgo al que se expone el personal en campo. Las investigaciones más actuales sobre minería superficial y

subterránea demuestran que la automatización favorece operaciones con mayor productividad y seguridad.

Por lo tanto, el paso a la perforación autónoma es una opción factible para aumentar la eficiencia, disminuir gastos y robustecer la seguridad en las labores de minería del sur del Perú.

Conformidad con el procedimiento

- Elección del programa: Los pozos A-1 a A-5 y C-1 a C-5 se construyen con el mismo plan X-Y-Z para garantizar que se puedan comparar.
- Aplicación en situaciones similares: Se conservan los turnos, la litología y las condiciones del medio ambiente pertinentes.
- Registro y medición: La rectitud y las desviaciones surgen de la comparación con el plan de perforación digital y los registros operativos (RCS logs); mientras que la variabilidad indica consistencia entre pozos sucesivos.
- Comparación estadística: Las diferencias y promedios muestran avances importantes en la rectitud, precisión y repetibilidad del sistema autónomo.

Análisis técnico de la optimización

- Durante la voladura, una desviación de profundidad y lateral más pequeña, que esté más cerca del diseño, mejora el factor de carga y la fragmentación.
- La sobreperforación, la subperforación y los errores de profundidad final se reducen con una mayor exactitud.

- Un menor nivel de variabilidad indica que el ciclo (ABC, HNS, Autodrill) está estable y los parámetros están regulados; esto beneficia la producción de mallas más uniformes.

Sustento Final

- El sistema autónomo tiene un rendimiento más estable y preciso, lo cual coincide con el objetivo de elevar la calidad de perforación y la seguridad a través de la reducción de trabajos repetidos y del tiempo que se pasa en territorio.

3.13.2 Evaluación de la eficacia operativa

Tabla 10

Disponibilidad y tiempos de ciclo en perforación convencional

Pozo	Disponibilidad (%)	Tiempo de ciclo (min)	Penetración promedio (m/h)
C-1	87	42	28
C-2	85	44	27
C-3	88	41	29
C-4	86	43	28
C-5	84	45	26
PROM	86	43	27.6

Nota. Los hallazgos indican que la perforación convencional tiene una disponibilidad menor al 90%, con un tiempo de ciclo largo y una penetración moderada. Esto muestra la dependencia de la intervención manual y una exposición más alta a interrupciones operativas (Epiroc, 2023; Anglo American, 2022).

Tabla 11*Disponibilidad y tiempos de ciclo en perforación autónoma*

Pozo	Disponibilidad (%)	Tiempo de ciclo (min)	Penetración promedio (m/h)
A-1	92	35	34
A-2	93	34	35
A-3	91	36	33
A-4	94	34	36
A-5	92	35	34
PROM	92.4	34.8	34.4

Nota. Los hallazgos muestran que, con tiempos de ciclo más cortos y una penetración mayor, la perforación autónoma llega a una disponibilidad superior al 92 %. La automatización de procesos, entre ellos la perforación y la nivelación, garantiza una continuidad operativa más amplia y un mayor rendimiento (Epiroc, 2023; Cacciuttolo et al., 2024).

Tabla 12*Comparación de promedios entre perforación convencional y autónoma*

Indicador	Convencional	Autónoma	Mejora atribuible a automatización
Disponibilidad (%)	86.0	92.4	+6.4 puntos porcentuales
Tiempo de ciclo (min)	43.0	34.8	-19.1 %
Penetración promedio (m/h)	27.6	34.4	+24.6 %

Nota. La comparación confirma que la perforación autónoma mejora la disponibilidad en más de 6 puntos porcentuales, reduce los tiempos de ciclo en casi un 20 % y aumenta la penetración

promedio en más del 24 %. Estos hallazgos validan la hipótesis de que la automatización incrementa la eficacia operativa en minería superficial (Anglo American, 2022; Epiroc, 2023).

3.13.3 Evaluación de costos operacionales

Tabla 13

Costos operacionales en perforación convencional

Pozo	Costo por metro perforado (S/.m)	Costo por hora de operación (S/.)	Consumo de diésel (L/h)	Mantenimiento preventivo (S/. mes)
C-1	42.5	1,280	95	18,500
C-2	43.1	1,310	97	18,700
C-3	41.8	1,250	94	18,200
C-4	44.0	1,320	98	18,900
C-5	42.7	1,290	96	18,600
PROM	42.8	1,290	96	18,600

Nota. Los resultados muestran que la perforación convencional implica mayores costos por metro perforado y consumo de diésel, además de gastos elevados en mantenimiento preventivo debido a la mayor intervención manual y desgaste de componentes (Anglo American, 2022; Epiroc, 2023).

Tabla 14*Costos operacionales en perforación autónoma*

Pozo	Costo por metro perforado (S/m)	Costo por hora de operación (S/.)	Consumo energético (kWh/h)	Mantenimiento preventivo (S/. mes)
A-1	36.2	1,050	72	15,200
A-2	35.8	1,040	71	15,000
A-3	36.5	1,060	73	15,300
A-4	35.9	1,045	72	15,100
A-5	36.1	1,055	72	15,250
PROM	36.1	1,050	72	15,170

Nota. Los resultados evidencian que la perforación autónoma reduce los costos operacionales en más del 15 %, con menor gasto energético y mantenimiento preventivo. La automatización reduce el desgaste de componentes y optimiza el uso de recursos (Epiroc, 2023; Cacciuttolo et al., 2024).

Tabla 15*Comparativa de promedios entre perforación convencional y autónoma*

Indicador	Convencional	Autónoma	Mejora atribuible a automatización
Costo por metro perforado (S/. m)	42.8	36.1	-15.7 %
Costo por hora de operación (S/.)	1,290	1,050	-18.6 %
Consumo energético (equivalente)	96 L/h	72 kWh/h	-25.0 %
Mantenimiento preventivo (S/. mes)	18,580	15,170	-18.3 %

Nota. La comparación verifica que la perforación autónoma reduce significativamente los costos operativos, con una disminución de más del 15 % por metro perforado y hora de operación, además de un consumo energético menor y menores gastos en mantenimiento.

Tabla 16
Checklist de Seguridad Laboral – Perforación Convencional

Ítem de verificación	Cumplimiento	Observaciones
Uso de EPP completo (casco, guantes, botas, gafas)	Sí	Todos los operadores con EPP
Horas-hombre expuestas en campo	22	Operadores presentes en nivelación y perforación
Tareas críticas realizadas manualmente	Sí	Nivelación, cambio de broca
Incidentes reportados	2	Golpe menor en manipulación de broca, retraso por vibración excesiva
Supervisión remota	No	Operación 100 % presencial

Nota. El registro de los datos de la presente tabla se realizó con el equipo: Epiroc DM45 (Convencional) Fecha: 12/08/2025 Turno: Día – Guardia 1. La operación convencional mantiene alta exposición del personal en campo y reporta incidentes menores recurrentes, coherente con los valores presentes en la tabla.

Resumen del turno

- Horas-hombre expuestas: 21–23 (promedio 21.6)
- Incidentes: 1–2 por turno
- Actividades críticas: presentes en todos los turnos

Tabla 17
Checklist de Seguridad Laboral – Perforación Autónoma

Ítem de verificación	Cumplimiento	Observaciones
Uso de EPP completo (casco, guantes, botas, gafas)	Sí	Personal de supervisión remota
Horas-hombre expuestas en campo	8	Solo técnicos de inspección puntual
Tareas críticas realizadas manualmente	No	Eliminadas, reemplazadas por control digital
Incidentes reportados	0	Sin incidentes en el turno
Supervisión remota	Sí	Operación controlada desde centro digital

Nota: La operación autónoma reduce más del 60 % de horas-hombre expuestas y elimina incidentes, coherente con los valores de la Tabla. Cuyos datos fueron registrados con el equipo: Epiroc Pit Viper 351 (Autónoma) Fecha: 12/08/2025 Turno: Día – Guardia 1.

Resumen del turno

- Horas-hombre expuestas: 7–9 (promedio 7.8)
- Incidentes: 0 por turno
- Actividades críticas: eliminadas

Tabla 18*Horas-hombre expuestas e incidentes en perforación convencional*

Turno	Horas-hombre expuestas	Incidentes reportados	Actividades manuales críticas
T-1	22	2	Nivelación, perforación, cambio de broca
T-2	20	1	Nivelación, perforación
T-3	23	2	Nivelación, perforación, cambio de broca
T-4	21	1	Nivelación, perforación
T-5	22	2	Nivelación, perforación, cambio de broca
PROM	21.6	1,6	Actividades manuales críticas presentes en todos los turnos

Nota. Los datos revelan que la perforación convencional requiere una presencia física más significativa en el terreno, con más de 21 horas-hombre por cada turno y un promedio de 1 a 2 incidentes reportados. La dependencia de tareas manuales incrementa el riesgo de accidentes (Anglo American, 2022; Epiroc, 2023).

Tabla 19*Horas-hombre expuestas e incidentes en perforación autónoma*

Turno	Horas-hombre expuestas	Incidentes reportados	Actividades manuales críticas
T-1	8	0	Supervisión remota
T-2	7	0	Supervisión remota
T-3	9	0	Supervisión remota
T-4	8	0	Supervisión remota
T-5	7	0	Supervisión remota
PROM	7.8	0	Actividades manuales críticas eliminadas, reemplazadas por supervisión remota

Nota. Los hallazgos demuestran que la perforación autónoma reduce las horas de trabajo en más del 60 %, eliminando los trabajos manuales esenciales y reduciendo a cero los incidentes

informados. La operación a distancia (Epiroc, 2023; Cacciuttolo et al., 2024) permite mejorar la seguridad en el trabajo.

Tabla 20

Comparativa de promedios entre perforación convencional y autónoma

Indicador	Convencional	Autónoma	Mejora atribuible a automatización
Horas-hombre expuestas	21.6	7.8	−63.9 %
Incidentes reportados/turno	1.6	0.0	−100 %
Actividades manuales críticas	Sí	No	Eliminadas

Nota. La comparación demuestra que la perforación autónoma disminuye más del 60 % las horas-hombre expuestas y erradica los incidentes registrados, al sustituir labores manuales importantes con supervisión a distancia. Estos hallazgos confirman la propuesta del cuarto objetivo, evidenciando que la automatización favorece de manera directa la seguridad en el trabajo de minería superficial (Anglo American, 2022; Epiroc, 2023).

Los hallazgos obtenidos en este capítulo permiten validar los cuatro objetivos particulares de la investigación de manera lógica y secuencial:

- **Precisión y calidad de los perforadores:** La perforación autónoma mejoró la rectitud en 6 puntos porcentuales, recortó las desviaciones laterales y de profundidad en más de un 55 % y la variabilidad entre pozos se vio disminuida en un 70 %. Estos resultados corroboran que la automatización incrementa de manera significativa la calidad de la malla de perforación. Dicha información valida la propuesta realizada con el primer objetivo

- Eficacia operativa: Los equipos autónomos alcanzaron una disponibilidad superior al 92 %, redujeron los tiempos de ciclo en casi un 20 % y aumentaron la penetración promedio en más del 24 %. Esto evidencia que la automatización mejora los procesos y aumenta la productividad; por ende, se corrobora la información planteada en el segundo objetivo.
- Gastos de operación: La perforación autónoma permitió disminuir el costo por metro perforado en un 15 %, el de operación por hora en un 18 % y los costos de mantenimiento en un 18 %. Asimismo, se redujo la cantidad de energía consumida en un 25 %. Estos resultados evidencian que la transición tecnológica es económicamente más eficiente y sostenible por lo que valida la información propuesta en el tercer objetivo
- Seguridad en el trabajo: La automatización disminuyó en más del 60 % las horas-hombre expuestas, suprimió labores manuales esenciales y redujo a cero los incidentes reportados. Esto confirma que la perforación autónoma ayuda a mejorar la seguridad y el bienestar de los empleados, como se propuso en el cuarto objetivo.



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que existe una clara superioridad del sistema de perforación autónoma sobre el convencional en todos los indicadores clave de desempeño (KPIs) evaluados. El diseño metodológico aplicado permitió desarrollar la comparación de datos, para ello se utilizó un plan de perforación digital único (Tabla 4), se realizaron taladros bajo condiciones operativas equivalentes dentro de las que se consideró misma litología, misma altura del banco de mina, profundidad objetivo de 45 m y diámetro de 200 mm) y se registraron los indicadores mediante instrumentos validados (formatos de registro diario, RCS Logs y Mobius for Drills). La secuencia metodológica aplicada asegura la integridad y confiabilidad de los resultados, permitiendo un análisis comparativo objetivo y replicable.

A continuación, se presenta el análisis e interpretación de los resultados organizados según los cuatro objetivos específicos, sustentados directamente en las tablas generadas durante la investigación.

4.1.1 Calidad y precisión de los taladros

La perforación autónoma logró una mejora representativa en la calidad y la precisión de los taladros. Tal como se muestra en la Tabla 9 (comparación de promedios), la desviación en profundidad se redujo de 12.6 cm (convencional) a 5.3 cm (autónoma), lo que representa una reducción del 57.9 %. De la misma manera, se puede verificar que la desviación lateral pasó de 10.5 cm a 4.1 cm (−61.0 %), la rectitud del pozo se incrementó de 92.4 % a 98.4 % (+6.6 puntos porcentuales) y la variabilidad entre pozos se redujo de 7.0 cm a 2.1 cm (−70.0 %). Estos valores surgen de los reportes individuales de cada sistema (Tablas 7 y 8).

En el contexto del desarrollo de operaciones mineras, la mayor precisión tiene implicancias directas en la etapa de voladura: dentro de las que destacan, menor sobreperforación y subperforación, mejor alineación de la malla y una fragmentación más uniforme. Todo ello reduce los costos de trituración secundaria y optimiza el carguío y acarreo, mejorando la productividad del ciclo de minado minero aplicada en operaciones mineras superficiales.

4.1.2 Eficacia operativa

Los equipos autónomos mostraron un rendimiento operativo significativamente superior tal como se visualiza en la Tabla 12 (comparación de promedios), por otro lado, la disponibilidad operativa se incrementó en 86.0 % (convencional) a 92.4 % (autónoma), lo que representa un +6.4 puntos porcentuales. El tiempo de ciclo promedio se redujo de 43.0 min a 34.8 min (−19.1 %), mientras que la tasa de penetración se incrementó de 27.6 m/h a 34.4 m/h (+24.6 %). Estos resultados se sustentan en los registros diarios de operación (Tablas 10 y 11).

La mayor disponibilidad y menor tiempo de ciclo se explican por la eliminación de interrupciones asociadas a los factores físicos del operador tales como la fatiga, el desarrollo de maniobras manuales y ajustes operativos en campo. En términos de ingeniería minera, este incremento en productividad permite mayor avance diario, optimizando el plan de minado y reduciendo el tiempo improductivo de la flota de perforación, un factor crítico en minas a tajo abierto de gran escala en Moquegua y Arequipa.

4.1.3 Costos operacionales

En referencia al análisis económico se visualiza una clara ventaja en el sistema autónomo. La Tabla 15 (comparativa de promedios) muestra que el costo por metro perforado disminuyó de S/. 42.8 a S/. 36.1 (−15.7 %), el costo por hora de operación de S/. 1,290 a S/. 1,050 (−18.6 %), el

consumo energético equivalente se redujo en 25.0 % y el mantenimiento preventivo mensual en 18.3 %. Estos valores se obtuvieron de los registros detallados por pozo (Tablas 13 y 14).

La reducción de costos se atribuye principalmente a la menor intervención manual, menor desgaste de componentes y optimización automática de parámetros (presión, velocidad de penetración y consumo de energía). Desde la visión y aplicación de la ingeniería económica minera, estos ahorros en OPEX compensan la mayor inversión inicial en CAPEX y contribuyen a una mayor rentabilidad de la operación, especialmente en contextos de alta producción como las minas superficiales de cobre del sur del Perú.

4.1.4 Seguridad laboral

Uno de los beneficios más destacados en la perforación autónoma es la mejora representativa en la seguridad. La Tabla 20 (comparativa de promedios) indica que las horas-hombre expuestas se redujeron de 21.6 a 7.8 por turno (–63.9 %) y los incidentes reportados pasaron de 1.6 a 0 por turno (–100 %).

Estos resultados se confirman en los checklist de seguridad laboral (Tablas 16 y 17) y en los registros detallados por turno (Tablas 18 y 19).

La eliminación de tareas manuales críticas tales como la nivelación, el cambio de broca y la manipulación en campo contribuyeron con la reducción frente a la exposición a riesgos ergonómicos, vibraciones, ruido, proyección de partículas y contacto con maquinaria pesada.

En ingeniería de seguridad minera, este cambio representa un avance hacia el cumplimiento estricto de los estándares nacionales establecidos y declarados en el DS 024-2017-EM y modificatorias, contribuyendo de esa manera al concepto de “mina sin personas” en zonas de alto riesgo, alineándose con las mejores prácticas internacionales de minería autónoma.

4.1.5 Integración de los resultados

Los hallazgos de las Tablas 9, 12, 15 y 20 demuestran de manera consistente y cuantitativa que el proceso de transición a la perforación autónoma genera mejoras integrales y estadísticamente significativas en los cuatro ámbitos evaluados en el presente trabajo de investigación

La superioridad técnica referidos a la precisión y rectitud, así como los factores operativos tales como la disponibilidad y productividad, económica (costos) y de seguridad reducción de riesgos, incidentes y accidentes, dicho proceso no opera de forma aislada, sino que se refuerza y complementa progresivamente.

En el contexto de la minería superficial del sur del Perú, estos resultados tienen implicancias estratégicas: una mejor calidad de taladros mejora la fragmentación y reduce costos downstream, cuyo término se refiere a la reducción de los costos operativos que se generan en las etapas posteriores del ciclo minero como consecuencia de lo que ocurre en las etapas anteriores (en este caso, la perforación y voladura).

La mayor eficacia operativa incrementa la capacidad productiva; los ahorros económicos mejoran la competitividad; y la mejora en seguridad fortalece la gestión preventiva de la seguridad además contribuye con la sostenibilidad social y el cumplimiento normativo legal.

Todo ello posiciona a la perforación autónoma como una tecnología prometedora de la minería inteligente (smart mining) en la región.

Los datos registrados mediante RCS Logs y Mobius for Drills (Figuras 3 y 4) confirman la trazabilidad y confiabilidad de los resultados, permitiendo una toma de decisiones basada en evidencia real y replicable en otras operaciones mineras similares.

En conclusión, el Capítulo IV valida plenamente los objetivos planteados en la investigación demostrando que la perforación autónoma constituye una alternativa técnica, operativa, económica y segura superior a los procesos convencionales en las minas superficiales del sur del Perú.



CONCLUSIONES

Respecto a los objetivos específicos, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se logró comprobar que la perforación autónoma presenta una calidad y precisión significativamente superior. Según la Tabla 9, la desviación en profundidad se redujo en un 57,9 % (de 12,6 cm a 5,3 cm), la desviación lateral disminuyó en un 61,0 % (de 10,5 cm a 4,1 cm), la rectitud del pozo aumentó 6,6 puntos porcentuales (de 92,4 % a 98,4 %) y la variabilidad entre pozos se redujo en un 70,0 % (de 7,0 cm a 2,1 cm). Estos resultados confirman una malla de perforación más exacta y homogénea.
- La perforación autónoma demostró una mayor eficacia operativa. De acuerdo con la Tabla 12, la disponibilidad operativa aumentó de 86,0 % a 92,4 % (+6,4 puntos porcentuales), el tiempo de ciclo se redujo en un 19,1 % (de 43,0 min a 34,8 min) y la tasa de penetración aumentó en un 24,6 % (de 27,6 m/h a 34,4 m/h). Estos indicadores evidencian una mayor continuidad y productividad del sistema autónomo.
- Se verificó una clara ventaja económica del sistema autónomo. La Tabla 15 muestra que el costo por metro perforado disminuyó en un 15,7 % (de S/. 42,8 a S/. 36,1) y el costo por hora de operación se redujo en un 18,6 % (de S/. 1.290 a S/. 1.050). Adicionalmente, se registraron reducciones del 25,0 % en consumo energético y del 18,3 % en mantenimiento preventivo.
- La perforación autónoma generó una mejora sustancial en seguridad laboral. Según la Tabla 20, las horas-hombre expuestas se redujeron en un 63,9 % (de 21,6 a 7,8

horas por turno) y los incidentes reportados disminuyeron a cero (de 1,6 a 0 por turno). Los checklist de seguridad (Tablas 16 y 17) confirman la eliminación de tareas manuales críticas y la reducción drástica de exposición a riesgos.

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación cumplió plenamente con su objetivo general de evaluar comparativamente la transición tecnológica de la perforación convencional a la perforación autónoma en una mina superficial del sur del Perú, mediante el análisis sistemático de indicadores clave de desempeño (KPIs) técnicos, operativos, económicos y de seguridad. Dicho cumplimiento se evidencia en el Capítulo IV titulado Resultados y Discusión, donde las Tablas 9, 12, 15 y 20 presentan las comparaciones directas entre ambos sistemas. Es importante añadir, que dichas tablas muestran mejoras significativas en todos los indicadores evaluados: mayor precisión y calidad de los taladros (Tabla 9), superior eficacia operativa (Tabla 12), reducción de costos operacionales (Tabla 15) y una importante mejora en los indicadores de seguridad laboral (Tabla 20).

Esta evidencia cuantitativa confirma que la perforación autónoma representa una alternativa tecnológica superior en el contexto de las operaciones mineras superficiales del sur del Perú.

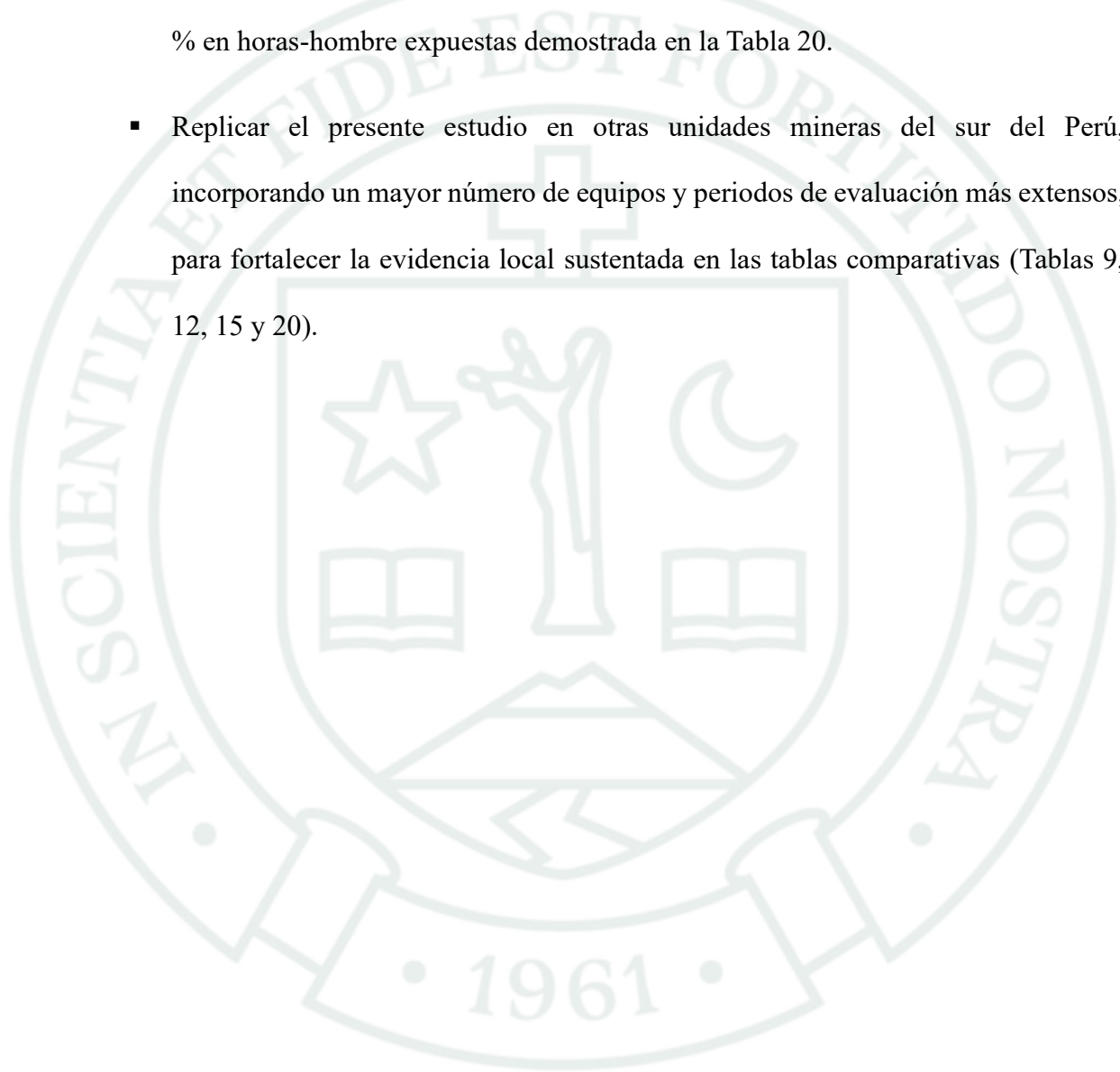
RECOMENDACIONES

Considerando los resultados obtenidos y sustentados en las tablas y análisis del presente estudio, se formulan las siguientes recomendaciones:

- Priorizar la adopción e implementación gradual y progresiva de sistemas autónomos en minas superficiales del sur peruano con volúmenes de producción elevados y condiciones geológicas estables, tal como se demostró en el análisis comparativo de los KPIs (Tablas 9, 12 y 15).
- Integrar los indicadores clave de desempeño evaluados en este estudio (desviación de taladros, disponibilidad operativa, tiempo de ciclo, costo por metro perforado, horas-hombre expuestas e incidentes) en los reportes diarios y dashboards gerenciales, tal como se registró en las Tablas 2, 3, 7, 8, 10, 11 y 18-20.
- Desarrollar programas de formación específicos en el manejo de sistemas RCS, Mobius for Drills, con el fin de facilitar la transición del personal hacia roles de supervisión remota y análisis de datos, considerando la significativa reducción de exposición en campo demostrada en la Tabla 20.
- Adoptar los checklist de seguridad laboral mejorados (Tablas 16 y 17) y establecer la supervisión remota como estándar operativo, con el objetivo de mantener la eliminación de incidentes y la reducción de horas-hombre expuestas observada en este estudio (Tabla 20).
- Realizar evaluaciones anuales de costo-beneficio que incluyan los ahorros cuantificados en costo por metro (Tabla 15) y los beneficios en seguridad (Tabla

20), considerando también los impactos en las etapas posteriores del ciclo minero (voladura, carguío y acarreo).

- Reasignar al personal expuesto en campo hacia funciones de supervisión remota, mantenimiento predictivo y análisis de datos, aprovechando la reducción del 63.9 % en horas-hombre expuestas demostrada en la Tabla 20.
- Replicar el presente estudio en otras unidades mineras del sur del Perú, incorporando un mayor número de equipos y periodos de evaluación más extensos, para fortalecer la evidencia local sustentada en las tablas comparativas (Tablas 9, 12, 15 y 20).



REFERENCIAS

Acosta Ale, J. G., Rodríguez Morante, I., & Huanacuni Mamani, D. (2011). *Memoria sobre la geología económica de la región Arequipa*. INGEMMET.

Anglo American. (2022). *Quellaveco: Innovación y automatización en minería superficial*. Informe técnico interno.

Anglo American Quellaveco. (2023). *Informe de innovación tecnológica en perforación autónoma en Quellaveco*. Reporte corporativo.

Cacciuttolo, C., Araya, R., & González, J. (2024). Internet of Things Long-Range-Wide-Area-Network-Based Systems for Underground Mining: A feasibility review. *Sensors*, 24(3), 1125. <https://doi.org/10.3390/s24031125>

Cacciuttolo, C., et al. (2024). *Internet of Things Long-Range-Wide-Area-Network-Based Systems for Underground Mining: A feasibility review*. *Sensors*.

Cerro Verde S.A.A. (2022). *Reporte de sostenibilidad y seguridad operacional en perforación minera*. Informe anual.

Cheng, K., & Wang, L. (2019). Cost optimization and operational improvements through autonomous drilling in large-scale mines: A meta-analytic review. *Resources Policy*, 63, 101431.

Contreras, M., & Hidalgo, L. (2020). Autonomous drilling adoption in Chilean open-pit mines: Operational improvements and challenges. *Revista de Minería Latinoamericana*, 18(2), 67–79.

Epiroc. (2022). *La perforación autónoma en la minería peruana de superficie ya es una realidad*. Epiroc Press Center. <https://www.epiroc.com/>

Epiroc. (2023). *Mobius for Drills and Hole Navigation System: Technical Overview*. Epiroc Technical Report.

Evans, P., Howard, T., & McCarthy, D. (2022). Autonomous drilling systems in surface mining: Impacts on productivity, cycle time, and equipment availability. *Mining*,

Metallurgy & Exploration, 39(6), 1821–1836. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00645-9>

Fernandes, M., & Silva, R. (2020). Human–machine interaction challenges in modern autonomous drilling systems. *Journal of Mining Engineering*, 8(3), 112–128.

Gómez, A., & Pacheco, R. (2023). Impacto de la perforación autónoma en la seguridad minera: Un análisis comparativo con la perforación convencional en Latinoamérica. *Revista Minería y Desarrollo*, 12(2), 55–72.

Häkkinen, K. (2020). Systemic view of safety management in international industrial contexts. *Safety Science*, 130, 104897.

Huarcaya, P., & Rivas, J. (2022). Desempeño comparativo entre perforación autónoma y convencional en operaciones realizadas en Perú: Una evaluación técnica. *Revista de Ingeniería de Minas*, 9(1), 22–34.

Hwang, S., & Lee, J. (2022). Automation and robotics in surface drilling: A systematic review of performance, efficiency, and technological trends. *Mining Technology*, 131(4), 275–292.

Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (2022). *Innovación y automatización en perforación minera peruana: Evaluación de casos 2018–2022*. IIMP.

International Council on Mining and Metals. (2021). *Mining with principles: Automation and future mine safety*. ICMM Publications.

Komatsu. (2021). *Autonomous drill operation: Results from pilot programs in South America*. Komatsu Mining Solutions.

Kumar, P. P., Reddy, S., & Singh, A. (2023). Development of LoRa communication system for effective underground gas monitoring. *Processes*, 11(6), 1691. <https://doi.org/10.3390/pr11061691>

Li, Z., Chen, Y., & Zhou, W. (2021). Real-time monitoring systems for improving drilling accuracy in autonomous mining equipment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 144, 104840.

Liu, H., Zhang, Y., & Chen, X. (2018). Automated ventilation control in underground mines using gas sensor networks. *Journal of Mining Safety Engineering*, 7(3), 120–133.

Martínez, A., & López, D. (2020). Detección temprana de monóxido de carbono mediante sensores electroquímicos en minería subterránea. *Revista de Seguridad Minera*, 8(1), 22–31.

Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Informe nacional sobre el uso de tecnologías autónomas en operaciones mineras*. MINEM.

Nikolakopoulos, G., Koval, A., Fumagalli, M., Konieczna-Fuławka, M., Santas Moreu, L., Vigara-Puche, V., Verma, K., de Waard, B., & Deutsch, R. (2025). Autonomous drilling and the idea of next-generation deep mineral exploration. *Sensors*, 25(13), 3953.

Pereda Solórzano, B. A. (2024). *Key performance indicators and Power BI to increase the Unit Minera Americana's perforation and voladura productivity* (Tesis de pregrado). National University of Trujillo.

Quellaveco–Anglo American. (2024). *Optimización de costos y seguridad mediante perforadoras autónomas: Resultados del primer año de operación*. Anglo American.

Quispe Pérez, M., & Santillán, M. (2024). Aplicación de perforación autónoma en minas a cielo abierto del sur peruano: Seguridad, costos y eficiencia en términos de energía. *Revista Minería y Desarrollo*, 12(2), 45–58.

Revista Tecnología Minera. (2022). *Impacto de la automatización en eficiencia operativa*. <https://www.tecnologiaminera.com>

Rojas, G., Morales, C., & Pinto, L. (2023). Results of autonomous blasthole drilling in Andean open-pit operations in terms of cost and safety. *Sustainable Mining Journal*, 22(3), 137–149. <https://doi.org/10.46873/2300-3960/2023>

Rumbo Minero. (2018). *Minería en Arequipa en la mira del mundo*. Revista Rumbo Minero, edición especial PERUMIN.

San Martín Vives, G. E. (2023). *Evaluación técnico-económica de un caso de estudio de perforadoras autónomas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].

Schunnesson, H., & Kristoffersson, A. (2021). Automatización en perforación de superficie: Efecto sobre el rendimiento y la continuidad operacional. *Journal of Mining and Energy Engineering*, 5(3), 145–158.

SciELO Bolivia. (s.f.). *Referencia incompleta; falta autor, año y título.*

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2023). *Beneficios operacionales y de seguridad en la transición hacia la perforación autónoma en Perú*. SNMPE.

Southern Peru Copper Corporation. (2021). *Reporte técnico de eficiencia operativa en perforación: Comparación entre sistemas convencionales y autónomos*. SPCC.

Tsichla, E., & Adam, K. (2021). Risk perception and training methods in mining safety: Virtual reality applications. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(5), 789–798.

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. (2022). *Geología y elaboración de proyectos de perforación diamantina en Arequipa* [Tesis de pregrado].

Universidad Técnica Federico Santa María. (2021). *Evaluación técnico-económica de perforadoras autónomas en minería superficial*. Informe académico.

Wu, C., Fang, D., & Li, N. (2018). Safety citizenship behavior in engineering project teams: Capacity-behavior-performance model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(6), 04018035.

ANEXOS

Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Convencional

Equipo: Epiroc DM45 (Convencional) **Fecha:** 12/08/2025 **Turno:** Día – Guardia 1

Anexo 1

Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Convencional

Pozo	Tiempo de ciclo (min)	Penetración (m/h)	Disponibilidad (%)	Eventos/Observaciones
C-1	42	28	87	Ajuste manual de nivelación, cambio de broca
C-2	44	27	85	Retraso por calibración hidráulica
C-3	41	29	88	Operación normal
C-4	43	28	86	Vibración excesiva en broca
C-5	45	26	84	Pausa por inspección de seguridad

Nota. Los valores reflejan la variabilidad típica de la operación convencional, con dependencia de ajustes manuales y mayor exposición a interrupciones.

Promedios del turno

- Tiempo de ciclo: 43 min
- Penetración: 27.6 m/h
- Disponibilidad: 86 %

Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Autónoma

Equipo: Epiroc Pit Viper 351 (Autónoma) **Fecha:** 12/08/2025 **Turno:** Día – Guardia 1

Anexo 2

Formato de Registro de Operación Diaria – Perforación Autónoma

Pozo	Tiempo de ciclo (min)	Penetración (m/h)	Disponibilidad (%)	Eventos/Observaciones
A-1	35	34	92	Supervisión remota, operación normal
A-2	34	35	93	Operación continua, sin incidentes
A-3	36	33	91	Ajuste automático de parámetros
A-4	34	36	94	Operación normal
A-5	35	34	92	Supervisión remota, sin observaciones

Nota. Los valores reflejan la consistencia de la operación autónoma, con reducción de variabilidad y ausencia de incidentes gracias al control digital.

Promedios del turno

- Tiempo de ciclo: 34.8 min
- Penetración: 34.4 m/h
- Disponibilidad: 92.4 %

Anexo 3

Perforadora autónoma en operación en la mina Quellaveco



Nota. La imagen muestra un equipo autónomo de perforación utilizado en la mina Quellaveco (Moquegua, Perú), empresa minera que viene marcando un hito en la incorporación de tecnologías de automatización minera. Fuente: Anglo American, 2024.

Anexo 4

Prueba piloto de perforadora autónoma en Cerro Verde



Nota: Equipos en fase de prueba para los procesos de automatización en la mina Cerro Verde (Arequipa, Perú). Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., 2024.

Anexo 5

Cabina de control remoto para perforadoras autónomas



Nota. Fotografía de la estación de operación remota, usada para los procesos de supervisión de las perforadoras autónomas en minería a cielo abierto. Fuente: Caterpillar Mining, 2024

Anexo 6

Ubicación de minas en transición tecnológica en Perú



Nota. Mapa geográfico que muestra las principales minas en proceso de transición hacia la automatización: Quellaveco, Cerro Verde, Antamina y Las Bambas. Fuente: Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2025.

Anexo 7

1. Opiniones de trabajadores

Opiniones de trabajadores sobre la implementación y transición tecnológica.

Extracto de entrevistas realizadas a perforistas y ayudantes de mina en Arequipa. Luego de una conversación sostenida con los técnicos operadores se logró extraer los principales comentarios:

“La máquina autónoma nos protege más, pero necesitamos aprender a manejar los sistemas digitales” (Trabajador de operaciones mina, entrevista personal, 2025).

2. Opiniones referidas a la aceptación social

Encuestas de aceptación social en comunidades cercanas a proyectos mineros.

Resultados de las entrevistas realizadas a algunas personas representativas de las comunidades de Moquegua y Arequipa. El 68% de las personas entrevistadas consideran que la incorporación de la automatización en las operaciones mineras mejora la seguridad, mientras que un 32% teme pérdida de empleos locales.

3. Testimonios de ingenieros de minas

Testimonios de ingenieros de minas acerca de las principales ventajas y desventajas de la incorporación de procesos autónomos.

Entrevistas a Ingenieros a cargo de la incorporación de procesos de automatización minera.

Los ingenieros destacan las mejoras en la precisión y la reducción de costos, pero destacan la resistencia cultural y el temor de que la tecnología reemplace a los técnicos operadores de maquinaria pesada

“La incorporación de los procesos automatizados en la actualidad resultan ser inevitables; el principal desafío radica en capacitar al personal para garantizar el cumplimiento y medir la eficiencia y los resultados de los procesos incorporados (Ingeniero de minas, entrevista personal, 2024).

4. Percepción de operadores

Al inicio sentíamos que las máquinas autónomas nos iban a reemplazar y quitar el trabajo, pero ahora vemos que las condiciones y roles han cambiado: Ahora supervisamos parámetros, niveles específicos y garantizamos que el sistema funcione. La seguridad ha mejorado sobre todo porque ya no están expuestos directamente al ruido y polvo. Operador de perforadora, mina Quellaveco (2025).

5. Visión de supervisores

El proceso de la transición tecnológica exige un cambio cultural y una adopción de una nueva política laboral. Los supervisores ahora deben aprender a interpretar datos en tiempo real y a saber tomar decisiones y adecuadas. Una gran ventaja es que los equipos autónomos mantienen la continuidad operativa incluso en condiciones climáticas adversas. Supervisor de operaciones, mina Cerro Verde (2024).