

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TESIS

**Transición de perforadoras manuales a autónomas para  
aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y preservar la  
seguridad del personal**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Militza Jamily Prieto Berrospi

 [0009-0008-6663-1856](https://orcid.org/0009-0008-6663-1856)

Asesor

MBA. Víctor Manuel Hernández Díaz

 [0000-0002-6505-0733](https://orcid.org/0000-0002-6505-0733)

LIMA – PERÚ

2025

---

Citar/How to cite	Prieto Berrospi [1]
Referencia/Reference	[1] M. Prieto Berrospi, " <i>Transición de perforadoras manuales a autónomas para aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y preservar la seguridad del personal</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Prieto, 2025)
Referencia/Reference	Prieto, M. (2025). <i>Transición de perforadoras manuales a autónomas para aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y preservar la seguridad del personal</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### ***Dedicatoria***

*Con amor para mis padres Elizabeth y Lorenzo, hermanos y abuelos fuente inagotable de inspiración para seguir creciendo personal y profesionalmente. Asimismo, para mi Miel y mis padrinos, que hoy me acompañan desde el cielo.*

## **Agradecimientos**

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Ingeniería, y a sus docentes, por haber sido parte fundamental de mi formación universitaria.

A mi asesor, Víctor Hernández, y a mi especialista, Eder Salazar, por el tiempo dedicado y sus valiosos aportes en la elaboración de mi tesis.

Asimismo, expreso mi sincero reconocimiento al equipo de Gestión y Planificación de Compañía Minera Antapaccay, especialmente a José, Julio, Alex y Patricia, quienes han contribuido de manera significativa a mi desarrollo profesional y personal, brindándome su confianza y la oportunidad de aprender en un entorno de excelencia.

## Resumen

El presente estudio se realizó en la Unidad Minera Antapaccay, evaluando el desempeño operativo, económico y de seguridad de la perforación en modos manual y autónomo. La investigación se desarrolló mediante la recopilación y análisis de KPIs como velocidad de perforación, tiempos de traslado, nivelación y propulsión, precisión de posicionamiento, disponibilidad operativa y costos por metro perforado.

Los resultados evidencian que la operación autónoma presenta mejoras sustanciales: incremento promedio en la velocidad de perforación, reducción de tiempos críticos entre 26% y 39%, aumento de disponibilidad en 17,9%, y una mayor precisión en posicionamiento (31,7% de mejora). Desde el punto de vista económico, aunque el CAPEX inicial de la autonomía es un 102% mayor, la reducción del OPEX supera los USD 15 millones, con un costo unitario por metro perforado un 10% menor y menores consumos de energía (9,9%) y combustible (14,6%).

La adopción de la perforación autónoma no solo incrementa la productividad y sostenibilidad de la operación, sino que también fortalece la seguridad, reduce la exposición del personal a riesgos y optimiza la gestión de recursos humanos y energéticos.

Palabras clave — Perforación, minería autónoma, KPIs, eficiencia operativa, seguridad minera, productividad, sostenibilidad.

## **Abstract**

This study was carried out at the Antapaccay Mining Unit to evaluate the operational, economic, and safety performance of drilling in manual and autonomous modes. The research involved collecting and analyzing key performance indicators (KPIs) such as drilling rate, tramming, leveling, and propelling times, positioning accuracy, operational availability, and cost per drilled meter.

The results demonstrate that autonomous drilling delivers substantial improvements: an average increase in drilling rate, reduction of critical cycle times by 26% to 39%, a 17.9% increase in availability, and a 31.7% improvement in positioning accuracy. From an economic perspective, although the initial CAPEX for autonomy is 102% higher, OPEX savings exceed USD 15 million, with a 10% lower unit cost per drilled meter and reductions in energy (9.9%) and fuel (14.6%) consumption.

The adoption of autonomous drilling not only enhances productivity and operational sustainability but also strengthens safety, minimizes personnel exposure to hazards, and optimizes human and energy resource management.

**Keywords** — Drilling, autonomous mining, KPIs, operational efficiency, mine safety, productivity, sustainability.

## Tabla de contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Descripción del problema de la investigación .....	1
1.2.1 Descripción de la problemática.....	1
1.2.2 Formulación del problema .....	2
1.3 Objetivos del estudio .....	2
1.3.1 Objetivo general .....	2
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Hipótesis del estudio .....	3
1.4.1 Hipótesis general.....	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	3
1.4.3 Operacionalización de variables.....	3
1.5 Antecedentes investigativos .....	4
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	4
1.5.2 Antecedentes nacionales .....	5
1.5.3 Antecedentes locales .....	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	9
2.1 Marco teórico.....	9
2.1.1 Geología .....	9
2.1.2 Operaciones unitarias .....	11
2.1.3 Perforación.....	14
2.1.4 Tipos de perforación.....	15
2.1.5 Parámetros de perforación .....	16

2.1.6	Perforación autónoma .....	20
2.1.7	Proveedores de tecnologías de perforación autónoma.....	20
2.1.8	Componentes de la perforación autónoma .....	22
2.1.9	Criterios de evaluación de rendimiento.....	23
2.1.10	Productividad de perforación .....	26
2.2	Marco conceptual .....	29
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....		31
3.1	Metodología del estudio .....	31
3.1.1	Tipo y diseño de la investigación.....	31
3.1.2	Unidad de análisis .....	31
3.1.3	Equipos de perforación.....	32
3.1.4	Etapas de la investigación .....	38
3.2	Variables e indicadores .....	39
3.2.1	Variable independiente.....	39
3.2.2	Variables dependientes .....	40
3.2.3	Indicadores.....	40
3.3	Fuentes de Datos .....	40
3.3.1	Fuentes Primarias: .....	40
3.3.2	Fuentes Secundarias .....	41
3.4	Instrumentos de recolección .....	41
3.5	Recolección de datos .....	42
3.5.1	Procedimiento de recolección de datos .....	42
3.5.2	Cronograma de implementación de la transición.....	42
3.6	Procesamiento y análisis de datos .....	45
3.6.1	Limpieza y validación .....	45
3.6.2	Métodos de análisis.....	45
3.6.3	Visualización y herramientas de soporte .....	46
3.7	Diseño del estudio longitudinal .....	46

3.7.1	Definición de períodos.....	46
3.7.2	Métricas de evaluación.....	46
3.8	Infraestructura tecnológica .....	47
3.8.1	Componentes del sistema de perforación autónoma.....	47
3.8.2	Descripción de la tecnología .....	49
3.8.3	Integración de sistemas.....	50
3.8.4	Desafíos técnicos.....	50
3.9	Aspectos éticos y consideraciones de seguridad.....	51
3.9.1	Ética en el uso de datos .....	51
3.9.2	Seguridad del personal.....	51
3.10	Limitaciones del Estudio.....	52
3.10.1	Restricciones en la calidad y disponibilidad de datos históricos .....	52
3.10.2	Interferencias externas y factores incontrolables.....	53
3.10.3	Limitaciones tecnológicas en la implementación de perforadoras autónomas .....	53
3.10.4	Impacto de la adaptación organizacional y humana .....	53
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....		56
4.1	Exploración estadística inicial de los datos de profundidad perforada .....	56
4.2	Análisis estadístico depurado de los datos de profundidad perforada.....	56
4.3	Análisis estadístico de la velocidad de perforación.....	57
4.4	Análisis de desempeño operativo .....	58
4.5	Análisis de indicadores operativos.....	62
4.5.1	Disponibilidad Operativa (%D).....	62
4.5.2	Uso de la disponibilidad (%UD).....	63
4.5.3	Proyección de la utilización (%U) .....	64
4.6	Análisis de costos.....	65
4.6.1	Inversión de Capital (CAPEX) .....	65
4.6.2	Costos Operativos (OPEX).....	67
4.6.3	Evaluación Financiera .....	71

4.7	Evaluación de la seguridad del personal .....	74
4.8	Beneficios observados y desafíos pendientes .....	75
4.8.1	Beneficios clave .....	75
4.8.2	Desafíos pendientes.....	75
4.9	Contrastación de la hipótesis.....	76
	Conclusiones .....	86
	Recomendaciones .....	88
	Referencias bibliográficas .....	90
	Anexos.....	93

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : H – TUM Modelo Armonizado de Tiempos.....	28
Tabla 2 : Vías de acceso a Compañía Minera Antapaccay – Cusco .....	32
Tabla 3 : Vías de acceso a Compañía Minera Antapaccay – Arequipa .....	32
Tabla 4 : Perforadoras en Compañía Minera Antapaccay.....	33
Tabla 5 : Especificaciones técnicas CAT MD6640.....	34
Tabla 6 : Especificaciones técnicas P&H320XPC.....	35
Tabla 7 : Especificaciones técnicas PIT VIPER 351 .....	36
Tabla 8 : Especificaciones técnicas CAT MD6540.....	37
Tabla 9 : Matriz de consistencia.....	55
Tabla 10 : Estadísticas descriptivas de profundidad perforada .....	56
Tabla 11 : Estadísticas descriptivas de profundidad perforada depurada .....	57
Tabla 12 : Estadísticas descriptivas de la velocidad de perforación.....	57
Tabla 13 : Estadísticas descriptivas de disponibilidad.....	62
Tabla 14 : Estadísticas descriptivas del uso de la disponibilidad.....	63
Tabla 15 : CAPEX Perforación Manual.....	65
Tabla 16 : CAPEX Perforación Autónoma .....	66
Tabla 17 : OPEX Perforación Manual .....	69
Tabla 18 : OPEX Perforación Autónoma.....	69
Tabla 19 : Evaluación Financiera Perforación Caso Manual.....	72
Tabla 20 : Evaluación Financiera Perforación Caso Autónomo.....	72
Tabla 21 : Resumen Financiero.....	73

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Perforación autónoma – Hexagon.....	20
Figura 2 : Perforación autónoma – FLANDERS .....	21
Figura 3 : Perforación autónoma – Epiroc.....	21
Figura 4 : Perforación autónoma – TELLUS Mining .....	22
Figura 5 : Ubicación de los 2 tajos U.M. Antapaccay .....	31
Figura 6 : Perforadora D4101 .....	33
Figura 7 : Perforadora D4102 .....	34
Figura 8 : Perforadora D4103 .....	35
Figura 9 : Perforadora D4104 .....	36
Figura 10 : Perforadora D4132 .....	37
Figura 11 : Etapas de la aplicación de la metodología .....	39
Figura 12 : Cronograma de transición tecnológica por unidad de perforación y gestión del cambio .....	44
Figura 13 : Componentes del sistema autónomo .....	49
Figura 14 : Tiempo de traslado a otro taladro (minutos).....	58
Figura 15 : Tiempo de nivelación (minutos) .....	59
Figura 16 : Tiempo de propulsión (minutos).....	60
Figura 17 : Desviación XY (metros) .....	61
Figura 18 : Metros perforados vs %utilización proyectada .....	64
Figura 19 : Prueba t – Student (Disponibilidad).....	78
Figura 20 : Prueba t – Student (Uso de disponibilidad) .....	79
Figura 21 : Prueba t – Student (Velocidad de perforación).....	80
Figura 22 : Prueba t – Student (Tiempo de traslado a otro taladro).....	81
Figura 23 : Prueba t – Student (Tiempo de nivelación) .....	82
Figura 24 : Prueba t – Student (Tiempo de propulsión).....	83
Figura 25 : Prueba t – Student (Desviación XY).....	84

## **Introducción**

El presente trabajo compara el desempeño de la perforación en modos manual y autónomo en la Unidad Minera Antapaccay, con el objetivo de evaluar su impacto en la seguridad, productividad, eficiencia y costos. La operación manual, dependiente en gran medida de la pericia del operador, presenta variabilidad en indicadores clave, mientras que la operación autónoma integra sistemas avanzados de navegación, control y análisis en tiempo real, reduciendo la intervención humana.

Se parte de una línea base obtenida en la operación manual, identificando limitaciones en tiempos de ciclo, precisión de posicionamiento, disponibilidad y costos. Posteriormente, se evalúa el modo autónomo, midiendo su influencia en KPIs como metros perforados por hora, tiempos de traslado y nivelación, desviación media en XY, disponibilidad y utilización efectiva.

El estudio también incorpora un análisis económico considerando CAPEX, OPEX, costos de operación tras la transición y proyecciones de utilización para el periodo 2024–2034, así como el impacto en seguridad y sostenibilidad operativa. Los resultados se traducen en recomendaciones estratégicas para la implementación progresiva de la autonomía, fortalecimiento de la capacitación técnica y optimización de la infraestructura tecnológica, consolidando a la perforación autónoma como un pilar de competitividad y sostenibilidad en la mina.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1 Generalidades

La presente investigación se desarrolla en el contexto de las operaciones de perforación en minería, donde actualmente predominan prácticas manuales que, si bien permiten el cumplimiento de los planes de producción, presentan limitaciones asociadas a la variabilidad operativa, mayores costos de operación, mayor exposición al riesgo humano y menor eficiencia en el uso de recursos.

La incorporación de la perforación autónoma surge como una alternativa tecnológica capaz de transformar esta realidad. A través de la automatización de los procesos, se busca reducir la dependencia de la intervención humana directa, mejorar la seguridad de los trabajadores al disminuir su exposición en el frente de perforación, y optimizar los indicadores de productividad y costos.

En este sentido, la tesis plantea una evaluación comparativa entre los modos manual y autónomo, con el propósito de demostrar los beneficios tangibles de la autonomía en términos de eficiencia operativa, reducción de costos y mejora en la sostenibilidad de las operaciones. De esta forma, se transforma la problemática actual de altos costos y riesgos, hacia una realidad futura más eficiente, segura y competitiva, alineada con los objetivos estratégicos de innovación y optimización en la industria minera.

## 1.2 Descripción del problema de la investigación

### 1.2.1 Descripción de la problemática

La minería es una de las principales actividades económicas en el Perú, representando una fuente clave de ingresos, empleo y desarrollo en las regiones mineras. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos significativos relacionados con la eficiencia operativa, seguridad y sostenibilidad. En el caso específico de la minería a cielo abierto (*open pit*), la necesidad de procesos altamente productivos y seguros es crítica debido a la magnitud de las operaciones y la complejidad de los entornos geológicos.

Sin embargo, el uso de perforadoras manuales limita el desempeño debido a su dependencia de la intervención humana, incrementando los riesgos de accidentes y generando altos costos por tiempos improductivos y desgaste de equipos (Martel, L. et al., 2021).

En el presente caso de estudio, las perforadoras manuales presentan problemas de improductividad, reflejados en tiempos operativos prolongados, inconsistencias en la perforación y altos costos por desgaste de componentes y uso ineficiente de recursos. Estas limitaciones afectan el cumplimiento del plan de perforación y contribuyen al incremento de los costos operativos, poniendo en evidencia la necesidad de un enfoque más eficiente y seguro en las operaciones mineras.

### **1.2.2 Formulación del problema**

#### **1.2.2.1 Problema general.**

- ¿En qué medida las perforadoras manuales inciden en las ineficiencias operativas, que afectan la productividad en la operación a tajo abierto?

#### **1.2.2.2 Problemas específicos.**

- ¿Cómo incide el uso de perforadoras manuales en el incremento de los costos operativos por metro perforado, debido a la baja eficiencia en el uso de recursos y el desgaste prematuro de los componentes?
- ¿Cómo influye la operación de las perforadoras manuales en los riesgos de seguridad del personal durante las actividades realizadas en el tajo abierto?

### **1.3 Objetivos del estudio**

#### **1.3.1 Objetivo general**

- Mejorar la eficiencia operativa en las perforaciones mineras mediante la implementación de perforadoras autónomas, incrementando la productividad en los procesos de perforación.

### 1.3.2 **Objetivos específicos**

- Reducir los costos operativos por metro perforado mediante la transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas, asegurando un uso eficiente de los recursos.
- Mitigar los riesgos de seguridad del personal asociados a la operación manual de las perforadoras, mediante el uso de perforadoras autónomas.

## 1.4 **Hipótesis del estudio**

### 1.4.1 **Hipótesis general**

La transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas mejorará la eficiencia operativa en las perforaciones mineras, incrementando la productividad.

### 1.4.2 **Hipótesis específicas**

- La transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas representará una reducción del 5% en los costos operativos por metro perforado en el futuro, al asegurar un uso más eficiente de los recursos.
- El uso de perforadoras autónomas reducirá los riesgos de seguridad para el personal en el futuro, al disminuir la dependencia de la operación manual en los procesos de perforación.

### 1.4.3 **Operacionalización de variables**

$$y = f(x) \quad (1)$$

**Aporte(x)** = Transición de perforadoras manuales a autónomas.

**Variable independiente:** Transición.

**Finalidad(y)** = Aumentar la eficiencia operativa, reducir los costos y preservar la seguridad del personal

**Variable dependiente:** Eficiencia, costos, seguridad.

**Aporte (X)** = Transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas.

**Variable independiente:** Transición.

**Finalidad (Y)** = Reducir los costos operativos por metro perforado.

**Variable dependiente:** Costos.

**Aporte (X)** = Transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas.

**Variable independiente:** Transición.

**Finalidad (Y)** = Mitigación de riesgos de seguridad

**Variable dependiente:** Seguridad.

## **1.5 Antecedentes investigativos**

### **1.5.1 Antecedentes internacionales**

A nivel internacional, países como Australia, Canadá y Chile han asumido el liderazgo en la implementación de tecnologías autónomas en minería, marcando un precedente en avances tecnológicos que han impulsado tanto la productividad como la sostenibilidad del sector. Estas naciones, gracias a su enfoque en innovación y desarrollo, han demostrado cómo la automatización puede transformar profundamente las operaciones mineras.

Según Hernández, C. (2018), en su tesis “Análisis de costes de producción con implementación de equipos automatizados tomando como ejemplo Mina Magdalena” analiza el impacto económico de la implementación de equipos automatizados en la Mina Magdalena. El estudio se centra en la automatización de procesos de perforación y cómo esta influye en los costos de producción. Los hallazgos indican que la adopción de tecnologías autónomas en perforación puede reducir significativamente los costos operativos y mejorar la eficiencia general de la mina, sirviendo como referencia para operaciones mineras que buscan modernizar sus procesos.

Khushaba, R. et al. (2022), en su estudio “*A Machine Learning Approach for Material Type Logging and Chemical Assaying from Autonomous Measure-While-Drilling (MWD) Data*” los autores presentan un enfoque basado en aprendizaje automático para automatizar la clasificación de tipos de material y el análisis químico durante las operaciones de perforación autónoma. Utilizando datos recopilados en tiempo real durante la perforación (MWD), el modelo desarrollado logra correlaciones significativas en la

predicción de composiciones químicas y la identificación precisa de materiales. Este avance tecnológico tiene el potencial de optimizar las operaciones mineras al proporcionar información geológica precisa de manera más eficiente y segura.

Dashavskaya, O. (2021), en su estudio “Impacto económico de la implementación de equipos robóticos y tele operados en la minería a cielo abierto” analiza el impacto económico de la automatización en la perforación minera a cielo abierto, destacando que la implementación de sistemas robóticos es altamente rentable. Los resultados muestran que la automatización de perforadoras permite recuperar rápidamente la inversión gracias a la reducción de costos operativos. Este trabajo refuerza la recomendación de implementar sistemas automatizados de control en perforación para optimizar la productividad y mejorar las condiciones operativas.

A pesar de los avances logrados, estos estudios también resaltan los desafíos comunes que enfrentan las operaciones mineras al integrar tecnologías autónomas. Entre ellos se incluyen la necesidad de superar la resistencia al cambio dentro de las organizaciones, asegurar la interoperabilidad entre los sistemas tecnológicos y garantizar el acceso a recursos técnicos y financieros adecuados.

En resumen, la experiencia internacional en países como Australia, Canadá y Chile demuestra que la implementación de tecnologías autónomas puede ser un catalizador de mejoras significativas en la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras. Sin embargo, para maximizar sus beneficios, es fundamental adoptar un enfoque integral que considere no solo las innovaciones tecnológicas, sino también los factores humanos y organizacionales que aseguren su implementación exitosa

### **1.5.2 Antecedentes nacionales**

La Cámara de Comercio del Perú (2021) destacó las tendencias hacia la automatización en el sector minero, subrayando su impacto tanto en la productividad como en la sostenibilidad de las operaciones. Este informe reveló que las grandes empresas mineras, particularmente aquellas con operaciones en la región sur del país, han sido

pioneras en la adopción de tecnologías avanzadas. Entre las innovaciones más notables se encuentran las perforadoras eléctricas y autónomas, que han transformado significativamente los procesos operativos al reducir costos y optimizar el tiempo de ejecución. Sin embargo, el informe también resaltó las disparidades existentes en el sector. Mientras las empresas de mayor envergadura cuentan con los recursos financieros y técnicos para integrar estas tecnologías, las pequeñas y medianas empresas mineras enfrentan desafíos sustanciales, como limitaciones presupuestarias, falta de personal capacitado y acceso restringido a soluciones tecnológicas de última generación.

Según Santillan, M. (2020), en el artículo “La perforación autónoma en la minería peruana de superficie ya es una realidad” enfatiza que la perforación autónoma en minería superficial se ha consolidado en Perú, con soluciones que han demostrado ser confiables, presentando resultados en la reducción de costos operacionales, mejora en la seguridad de los trabajadores y garantía de continuidad operativa. Experiencias exitosas en minas como Quellaveco y Antamina evidencian los avances tecnológicos y beneficios de la automatización en el sector minero peruano.

Andújar, J. (2020), en su tesis “Minería del cobre en Perú: análisis de las variables críticas para su competitividad y propuestas de mejora” analiza la competitividad de la minería del cobre en el Perú, destacando la importancia de la innovación tecnológica. Se menciona la implementación de vehículos autónomos como los camiones, perforadoras y drones para exploración y operaciones mineras, lo que refleja una tendencia hacia la automatización en el sector.

Mendoza, P. (2017), en su tesis “Perforadora de rocas tele operada para la minería profunda, con control autónomo del brazo hidráulico en un grado de libertad” aborda el diseño de una perforadora de rocas tele operada para minería subterránea, enfocándose en la automatización del brazo hidráulico. Lo cual permitió mejorar la eficiencia y seguridad en operaciones de perforación, reduciendo la exposición de los operarios a condiciones adversas y optimizando la precisión en las tareas de perforación. El estudio incluye la selección de sensores y actuadores adecuados para la tele operación y el control

autónomo del equipo, tomando como referencia el jumbo hidráulico Boomer 282 de Atlas Copco.

Camarena, A. (2019), en su tesis "Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina" analiza cómo las diversas propiedades del macizo rocoso afectan los rendimientos en la velocidad de perforación en la Compañía Minera Antamina. Donde destaca que la incorporación de perforadoras autónomas puede mejorar significativamente la velocidad de perforación, lo que influye directamente en la reducción de costos operativos. Estas tecnologías permiten minimizar los tiempos de ejecución de pozos y, por ende, aumentar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras.

A pesar de estos avances, los autores identificaron varios retos que limitan la implementación masiva de estas tecnologías. Uno de los principales desafíos es la falta de interoperabilidad entre sistemas, ya que muchas minas operan con soluciones desarrolladas por distintos proveedores que no siempre son compatibles entre sí. Esta fragmentación tecnológica dificulta la integración de los datos y la coordinación eficiente de los procesos automatizados. Otro obstáculo significativo es la resistencia al cambio cultural dentro de las organizaciones. En muchas empresas mineras, especialmente en aquellas con una fuerza laboral mayoritariamente tradicional, la adopción de tecnologías autónomas se percibe con escepticismo debido a temores relacionados con la pérdida de empleos y la complejidad de las nuevas herramientas.

### **1.5.3 Antecedentes locales**

Según el INEI (2024) en el Perú, la minería es un sector clave para la economía nacional, representando aproximadamente el 15% del Producto Bruto Interno (PBI) y generando más del 60% de las exportaciones totales. A pesar de su importancia, la implementación de tecnologías avanzadas, como las perforadoras autónomas, enfrenta desafíos significativos debido a la complejidad de los yacimientos, la falta de infraestructura adecuada y las barreras económicas.

En el ámbito de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), diversas investigaciones han abordado la adopción de tecnologías avanzadas en la minería peruana.

Matos, C. (2022), en su proyecto de investigación llamado "Modelo de robot oruga articulado móvil para un proceso de trazado de la malla de perforación para voladura de frente de una mina subterránea" desarrolla un modelo de robot oruga articulado diseñado para automatizar el trazado de mallas de perforación en operaciones de voladura en minas subterráneas. Este enfoque busca mejorar la precisión y eficiencia en el proceso de perforación, reduciendo la exposición del personal a entornos de alto riesgo y optimizando los tiempos operativos, lo cual nos muestra como la automatización dentro de los procesos de perforación nos brindan significativas mejoras.

Calle, O. (2023), en el artículo "Innovaciones en perforación y voladura en minería subterránea" presenta avances recientes en técnicas de perforación y voladura aplicadas a la minería subterránea. Se enfatiza el uso de tecnologías de automatización y sistemas de control remoto que han ayudado a mejorar la precisión y seguridad en las operaciones de perforación, así como a optimizar los costos y tiempos de producción.

Estos estudios reflejan el interés de la UNI por estudiar la viabilidad y los beneficios de integrar tecnologías avanzadas en la minería peruana. Si bien los resultados son prometedores, también se identificaron diversos obstáculos, como la alta inversión inicial, la capacitación del personal y la adaptación de las tecnologías a las condiciones geológicas particulares de las minas del país.

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Geología

**Yacimiento.** El yacimiento es un depósito cuprífero de tipo pórfido-skarn, que forma parte de un cinturón metalogénico asociado con la actividad magmática de los Andes Centrales. Los pórfidos cupríferos son conocidos por estar relacionados con magmas intrusivos que se emplazan en zonas de subducción, como es el caso de la región andina. Según Sillitoe (2010), los depósitos de este tipo se generan cuando fluidos hidrotermales cargados de metales circulan a través de fallas y fracturas en la corteza terrestre, lo que resulta en la mineralización de sulfuros metálicos. En este caso, la mineralización está asociada a intrusivos granodioríticos y tonalíticos, que forman la roca huésped principal del depósito.

Las estructuras de fallas y fracturas juegan un rol clave en la concentración de los minerales. La circulación de fluidos hidrotermales en estos sistemas permite la deposición de sulfuros de cobre como calcopirita, bornita y molibdenita, entre otros. Además, las alteraciones hidrotermales en la roca huésped se manifiestan como alteración potásica en el núcleo del pórfido, con zonas de alteración fílica y propilítica hacia las periferias del yacimiento (Perelló et al., 2015; INGEMMET, 2019). Estas zonas presentan características que permiten la extracción de cobre de manera eficiente, ya que los minerales de cobre se encuentran en formas accesibles para la lixiviación y otras técnicas de extracción.

**Mineralización.** La mineralización del yacimiento está dominada por sulfuros primarios, siendo la calcopirita el mineral de cobre más común. Esta mineralización se encuentra principalmente en forma diseminada, a lo largo de fracturas y venas, pero también en zonas de stockwork. Junto a la calcopirita, la bornita está presente en menores cantidades, aunque su valor económico es significativo debido a la asociación con oro. En algunas zonas de la mina, se han observado enriquecimientos en metales preciosos,

especialmente oro, que son importantes en la explotación del yacimiento (Sillitoe, 2010; Cooke et al., 2020).

La mineralización se encuentra en un sistema hidrotermal que ha pasado por diferentes etapas de evolución. Las primeras fases de mineralización estuvieron dominadas por la calcopirita y bornita, mientras que las etapas posteriores involucraron la precipitación de minerales secundarios, tales como malaquita y azurita, que se forman en la zona de oxidación y están relacionados con los procesos de meteorización (INGEMMET, 2019).

En general, la distribución de la mineralización sigue un patrón zonal, en el que la concentración de cobre y molibdeno es más alta en el núcleo del pórfido, mientras que en las zonas periféricas la mineralización disminuye tanto en términos de ley como en extensión (Perelló et al., 2015).

**Geología regional.** La geología regional de la mina está influenciada por un contexto tectónico de subducción activa, donde la Placa de Nazca se subduce bajo la Placa Sudamericana. Este proceso ha generado una serie de intrusivos magmáticos, tanto plutónicos como volcánicos, que han dado lugar a los depósitos cupríferos tipo pórfido, presentes a lo largo de los Andes Centrales. La actividad hidrotermal asociada a estos intrusivos es responsable de la mineralización en forma de sulfuros de cobre, oro y molibdeno (Camus, 2019).

La geología regional también se caracteriza por la presencia de sistemas de fallas y pliegues que han controlado la ubicación de los depósitos minerales. Las principales estructuras tectónicas en la región son fallas de rumbo y direcciones noroeste-sureste, que han facilitado la circulación de fluidos hidrotermales. Además, las rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico y Mioceno han sido sometidas a deformación por los procesos tectónicos, creando ambientes propicios para la mineralización de cobre (Sillitoe, 2010; Perelló et al., 2015).

**Estratigrafía regional.** La estratigrafía regional está dominada por una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico y Mioceno. Estas unidades se

encuentran superpuestas por intrusivos magmáticos que fueron emplazados durante el Mioceno, específicamente entre 10 y 14 millones de años, según las dataciones recientes (Camus, 2019; INGEMMET, 2019). Las principales unidades estratigráficas incluyen:

- **Formación Ferrobamba (Cretácico Superior):** Esta unidad está compuesta por calizas y dolomitas, las cuales, al entrar en contacto con los intrusivos, generan mineralización de tipo skarn, favoreciendo la acumulación de sulfuros de cobre.
- **Secuencias volcánicas del Mioceno:** Estas formaciones incluyen flujos piroclásticos, tobas y lavas andesíticas que, junto con los intrusivos, constituyen la mayor parte de la corteza superficial. Estas unidades volcánicas han sido fundamentales para la alteración hidrotermal que ha concentrado los minerales metálicos.
- **Intrusivos del Mioceno:** Los intrusivos granodioríticos y tonalíticos que se encuentran en la región tienen un papel crucial en la mineralización, ya que son la roca huésped principal de los depósitos de cobre. La interacción entre estos intrusivos y las estructuras tectónicas ha resultado en la formación de los depósitos pórfidos cupríferos.

La combinación de estos elementos geológicos y estratigráficos ha creado un ambiente favorable para la formación de grandes depósitos de cobre, que continúan siendo de interés para la minería en la región.

### **2.1.2 Operaciones unitarias**

Las operaciones unitarias en la minería superficial son las actividades fundamentales realizadas para extraer minerales de los depósitos situados cerca de la superficie terrestre. Estas operaciones son esenciales para el desarrollo de un proyecto minero, ya que influyen directamente en la eficiencia de la extracción y la seguridad operativa. A continuación, se detallan las principales operaciones unitarias utilizadas en la minería superficial, con énfasis en sus características y funciones dentro de la cadena productiva.

**Perforación.** La perforación es la primera etapa del proceso de extracción en minería superficial. Se utiliza para perforar la roca madre y obtener muestras representativas del yacimiento, así como para permitir la explosión controlada de la roca en la siguiente etapa. Dependiendo del tipo de material a extraer y la profundidad del yacimiento, se emplean diversos tipos de perforadoras, tales como perforadoras de diamante (para exploración) y perforadoras de percusión (para trabajos de minería en producción) (Hustrulid, 2013).

La perforación tiene varias finalidades dentro de las operaciones unitarias:

- **Exploración:** Conocer las características del yacimiento, tales como el tipo de mineralización, la ley del mineral, y la geometría del cuerpo mineral.
- **Preparación de voladuras:** El trazado de los barrenos para la colocación de explosivos en la minería a cielo abierto, lo que permite fragmentar el material para su posterior remoción.

La tecnología de perforación ha avanzado significativamente en las últimas décadas, con la incorporación de perforadoras automáticas, que mejoran la precisión y reducen el tiempo de operación (Cooke et al., 2020).

**Voladura.** La voladura es una operación unitaria esencial en la minería superficial, ya que permite la fragmentación de la roca para facilitar su remoción y transporte. En esta etapa, se utilizan explosivos para fracturar la roca, haciéndola más manejable para la excavación y el carguío. Los tipos de voladuras incluyen voladuras de producción y voladuras de desarrollo, cada una con sus características específicas de diseño y aplicación (Sillitoe, 2010).

El proceso de voladura consta de los siguientes pasos:

- **Diseño del patrón de voladura:** Determinación de la cantidad de explosivo, la profundidad de los barrenos y la disposición de estos, para asegurar una fragmentación óptima.
- **Colocación de explosivos:** Inserción de los explosivos en los barrenos perforados, seguidos por la detonación controlada.

- **Fragmentación de la roca:** El objetivo de la voladura es generar fragmentos de roca que sean lo suficientemente pequeños para ser manipulados fácilmente por las excavadoras y transportados sin complicaciones.

El control de las voladuras es crucial para evitar problemas como la fragmentación excesiva, la vibración del terreno y la dispersión de material no deseado (Perelló et al., 2015).

**Carguío.** El carguío es el proceso de trasladar el material fragmentado hacia los vehículos de transporte. En minería superficial, esta operación es llevada a cabo principalmente mediante palas o excavadoras, que cargan el material en camiones de acarreo (*haulers*). El tipo de equipo empleado depende de la naturaleza del mineral y el material estéril, así como de la accesibilidad del yacimiento.

En proyectos de minería a cielo abierto, se utiliza maquinaria de gran tamaño, como palas de cable, palas hidráulicas o excavadoras, que tienen la capacidad de manipular grandes volúmenes de material a un ritmo elevado (Sillitoe, 2010).

El carguío eficiente es fundamental para reducir los tiempos de ciclo y mejorar la productividad del proceso minero. La elección del equipo de carguío debe considerar tanto la capacidad de la pala como el tamaño de los camiones de acarreo para asegurar una correcta sincronización en la operación.

**Transporte o acarreo.** El transporte es otra operación unitaria crítica en la minería superficial, ya que consiste en mover el material extraído desde el área de excavación hasta el lugar de procesamiento o almacenamiento. Dependiendo de la topografía y la distancia entre el sitio de extracción y la planta de procesamiento, se utilizan camiones de acarreo (*dump trucks*), cintas transportadoras o sistemas de transporte ferroviario.

Los factores que influyen en la elección del medio de transporte son:

- **Distancia:** En minas de gran tamaño, el transporte por camión es común, pero si la distancia es considerable, se puede utilizar el transporte ferroviario o las cintas transportadoras (Cooke et al., 2020).

- **Accesibilidad:** En terrenos difíciles o en operaciones subterráneas cercanas a la superficie, los camiones y trenes ofrecen mayor flexibilidad y capacidad de carga.

El transporte eficiente también depende de la optimización de rutas, la gestión del tráfico y el mantenimiento adecuado de los vehículos para evitar retrasos y aumentar la productividad.

**Remoción de estériles.** La remoción de estériles se refiere a la excavación y el traslado de material que no contiene minerales valiosos, pero que debe ser removido para acceder al cuerpo mineral. Este proceso es esencial en las operaciones de minería a cielo abierto, donde se extraen grandes volúmenes de material estéril para exponer el mineral debajo de la superficie. El estéril es transportado a escombreras o a lugares destinados para su disposición (Hustrulid, 2013).

Las técnicas utilizadas para la remoción de estériles son similares a las de carguío, pero suelen involucrar maquinaria de mayor capacidad, como palas más grandes o camiones de mayor tonelaje.

### **2.1.3 Perforación**

La perforación es una de las operaciones más fundamentales y necesarias en la minería, especialmente en minería superficial, debido a su papel crucial en la fragmentación de rocas y la creación de agujeros para la colocación de explosivos. La minería superficial, como la minería a cielo abierto, depende de la perforación para facilitar la extracción de materiales de manera eficiente. La perforación minera no solo implica la creación de agujeros en las rocas, sino que también se emplea para la recolección de muestras geológicas, la evaluación de los recursos minerales y la mejora de las condiciones de seguridad en la mina.

Según Hartman, H et al. (2002), la perforación permite mejorar la eficiencia del proceso minero, reducir los costos de operación y, cuando se ejecuta correctamente, minimizar el impacto ambiental de la minería.

#### **2.1.4 Tipos de perforación**

**Perforación rotatoria.** La perforación rotativa es un método ampliamente utilizado que emplea una broca que gira a alta velocidad para penetrar en la roca. Es especialmente adecuada para terrenos blandos y homogéneos. Este método es común en minería de carbón y depósitos sedimentarios, donde se requiere perforación de gran diámetro. Además, se caracteriza por su alta velocidad de perforación y costos operativos relativamente bajos (Hartman y Mutmansky, 2002).

**Perforación de percusión.** La perforación por percusión utiliza un martillo que golpea repetidamente la roca para fracturarla. Este sistema es particularmente efectivo en terrenos duros y fracturados, donde otros métodos son menos eficientes. Es común en minería metálica y exploración geotécnica, ya que permite una alta capacidad de penetración y precisión en barrenos profundos (Jimeno et al., 1995).

**Perforación combinada percusión-rotatoria.** La perforación combinada utiliza la acción rotatoria y percutora para atravesar terrenos mixtos. Este método mejora la eficiencia al adaptarse a condiciones geológicas variables, reduciendo los tiempos de perforación y optimizando recursos. Es particularmente útil en operaciones que abarcan diferentes tipos de roca en una misma perforación. (Lowrie, R.,2002).

**Perforación con martillo en fondo (DTH).** Este método combina la percusión en el fondo del barreno con la rotación, utilizando un martillo que opera directamente detrás de la broca. Es ideal para terrenos duros y perforaciones profundas, proporcionando alta precisión y velocidad. Es ampliamente utilizado en minería metálica y trabajos en roca compacta (Epiroc, 2023).

**Perforación diamantina.** La perforación diamantina emplea brocas con incrustaciones de diamante para cortar la roca mediante abrasión. Es el método estándar en exploración minera para recolectar muestras de núcleo, permitiendo una evaluación precisa de los depósitos minerales. Este método ofrece datos geológicos detallados, esenciales para la planificación minera (McCray, A. et al., 2016).

### 2.1.5 Parámetros de perforación

La perforación en minería es una de las operaciones más fundamentales, y el éxito de esta actividad depende de una serie de parámetros. Estos parámetros pueden dividirse en dos grandes categorías: controlables y no controlables. La distinción entre estos dos tipos de parámetros es crucial para maximizar la eficiencia de la perforación, reducir los costos operativos y asegurar la seguridad de los operarios.

**Parámetros controlables.** Los parámetros controlables son aquellos que pueden ser modificados o ajustados por los operadores, técnicos y equipos de perforación en función de las condiciones de la roca, los objetivos del proyecto y las necesidades operativas. A continuación, se describen los parámetros controlables más importantes:

- **Velocidad de avance (V).** La velocidad de avance es uno de los parámetros más importantes en perforación, ya que afecta directamente la eficiencia de la operación. Se refiere a la distancia que avanza la broca en un tiempo determinado.

La fórmula general para la velocidad de avance es:

$$V = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Donde:

V = Velocidad de avance (m/h)

d = Distancia perforada (m)

t = Tiempo de perforación (h)

La velocidad de avance depende de varios factores como la dureza de la roca, el tipo de broca utilizada y las condiciones del terreno (Hustrulid, 1999).

- **Velocidad de rotación de la broca (RPM - Revoluciones por Minuto).** La velocidad de rotación de la broca, medida en revoluciones por minuto (RPM), es un parámetro clave en la perforación, ya que afecta la tasa de penetración y la vida útil de las herramientas. En formaciones duras, se recomienda una rotación baja para reducir el desgaste, mientras que en terrenos blandos se pueden usar velocidades más altas. Este parámetro debe ajustarse junto con otros factores, como la presión

de empuje y la velocidad de avance, para optimizar la eficiencia operativa y minimizar los costos. (Sandvik Mining Handbook, 2020).

- **Presión de perforación (WOB - Weight on Bit).** La presión aplicada por la broca sobre la roca es otro parámetro clave. Una presión demasiado baja puede resultar en un avance lento, mientras que una presión demasiado alta puede causar un mayor desgaste de la broca y daños a la maquinaria.

La fórmula de presión de perforación es:

$$WOB = P \times A \quad (3)$$

Donde:

WOB = Presión de empuje (kN)

P = Presión aplicada (Pa)

A = Área de contacto (m<sup>2</sup>)

La presión de perforación debe ajustarse en función de la resistencia de la roca y la profundidad de la perforación (Hustrulid, 1999).

- **Tipo de broca.** El tipo de broca es esencial en la perforación, ya que determina la tasa de penetración, el desgaste de las herramientas y la eficiencia del proceso.

Los tipos principales incluyen:

**Brocas tricónicas:** Utilizadas en formaciones de dureza media a alta, ofrecen durabilidad y versatilidad en diferentes terrenos.

**Brocas de botones:** Ideales para terrenos duros debido a su capacidad para soportar altas presiones y mantener altas tasas de penetración.

**Brocas de arrastre:** Recomendadas para terrenos blandos, permiten una perforación rápida con menor desgaste.

La correcta selección del tipo de broca optimiza el desempeño y reduce costos operativos. (Brady, B. et al., 2007)

- **Frecuencia de impacto (f):** La frecuencia de impacto es un parámetro fundamental en perforaciones que utilizan martillos, ya que determina el número de golpes por minuto aplicados a la roca. Este valor afecta directamente la eficiencia del proceso

y el desgaste de las herramientas, siendo especialmente relevante en terrenos duros.

La fórmula para calcular la frecuencia de impacto es:

$$f = \frac{n}{T} \quad (4)$$

Donde:

f = Frecuencia de impacto (golpes/minuto)

n = Número de golpes

T = Tiempo total de perforación (minutos)

Un aumento en la frecuencia de impacto puede mejorar la eficiencia de perforación en rocas más duras. (Brady, B. et al., 2007)

**Parámetros no controlables.** Los parámetros no controlables son aquellos que dependen de factores externos y no pueden ser modificados por los operadores. Sin embargo, estos factores deben ser monitoreados y considerados durante la planificación de la perforación.

- **Tipo de roca.** La dureza de la roca afecta significativamente la tasa de penetración y el desgaste de las herramientas. Las rocas más duras requieren mayor energía para ser fracturadas, lo que puede disminuir la velocidad de perforación. Este parámetro no puede ser modificado, pero puede influir en la selección de brocas y equipos. La clasificación de dureza de Mohs es comúnmente utilizada para evaluar este aspecto. (Hoek, E. et al., 1980).
- **Humedad del terreno.** La humedad del terreno puede influir en la estabilidad del pozo y en el rendimiento de las herramientas de perforación. En suelos o formaciones rocosas con alta humedad, existe un mayor riesgo de colapsos o derrumbes debido a la saturación del material. Además, la presencia de agua puede afectar la eficiencia de los equipos neumáticos y la calidad del corte, especialmente en terrenos arcillosos donde el agua puede generar adhesiones no deseadas. (Goodman, R. ,1989).

- **Discontinuidades Geológicas.** Las fracturas, fisuras y capas de roca blanda dentro de una formación pueden alterar la eficiencia de la perforación, desviando la trayectoria del pozo o causando variaciones en la velocidad de avance. Estas discontinuidades son impredecibles y deben ser evaluadas mediante estudios geológicos previos. (Brady, B. et al., 2007)
- **Presión en el Subsuelo.** La presión en el subsuelo influye en la estabilidad del pozo y en la capacidad de las herramientas para operar eficientemente. En altas presiones, es común utilizar fluidos de perforación para equilibrar las fuerzas, pero estas condiciones pueden aumentar el riesgo de colapsos o fugas. (Mitchell, J. et al., 2005)
- **Condiciones Climáticas.** Las condiciones externas como lluvias, viento o temperaturas extremas pueden afectar la estabilidad del terreno, la seguridad de los operadores y el rendimiento de los equipos. Aunque no se pueden controlar, estas condiciones deben considerarse al planificar las operaciones. (Schön, J., 2015)
- **Variabilidad Mineralógica.** La composición mineral de la roca puede variar incluso dentro de un mismo yacimiento, afectando la resistencia y abrasividad del material. Esta variabilidad impacta en el diseño de herramientas y el tiempo requerido para la perforación. (Clark, G., 1987)
- **Condiciones ambientales.** Las condiciones como la temperatura, la presión atmosférica o la presencia de agua subterránea afectan el rendimiento de la perforación. Estos factores no pueden controlarse, pero pueden modificarse mediante adaptaciones en el equipo o la técnica empleada (Marsh & Wang, 2015).
- **Composición geológica.** Las variaciones geológicas, como la presencia de fracturas o pliegues en las rocas, afectan la dificultad de la perforación. Este parámetro es impredecible, pero debe tenerse en cuenta en el diseño de la perforación (Reid, 2010).

### 2.1.6 **Perforación autónoma**

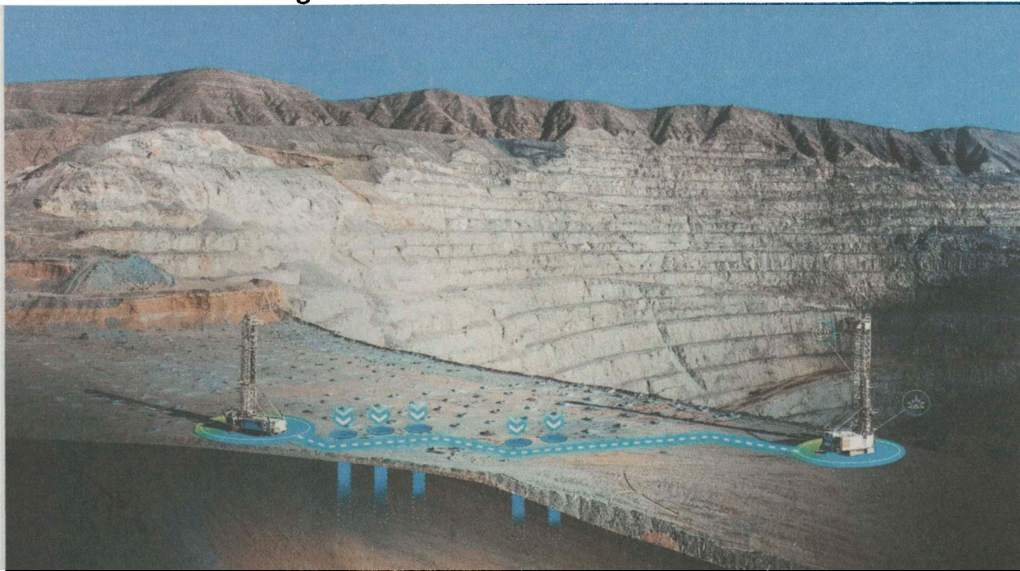
La perforación autónoma se refiere al uso de sistemas automatizados para realizar operaciones de perforación sin intervención directa de un operador. Estos sistemas utilizan tecnologías avanzadas como sensores, algoritmos de inteligencia artificial y sistemas de control remoto para ejecutar tareas de perforación con alta precisión y eficiencia. En minería a cielo abierto, la perforación autónoma mejora la seguridad al reducir la exposición de los operadores a ambientes peligrosos, al tiempo que optimiza la productividad mediante la reducción de tiempos de inactividad y la ejecución precisa de los planes de perforación.

### 2.1.7 **Proveedores de tecnologías de perforación autónoma**

**Hexagon AB:** Ofrece soluciones integradas que combinan sistemas de comando y control, control físico y seguridad para facilitar la transición hacia operaciones mineras autónomas. Sus tecnologías permiten a las minas desarrollar una hoja de ruta hacia la autonomía total, mejorando la eficiencia y seguridad en las operaciones.

#### **Figura 1**

*Perforación autónoma – Hexagon*



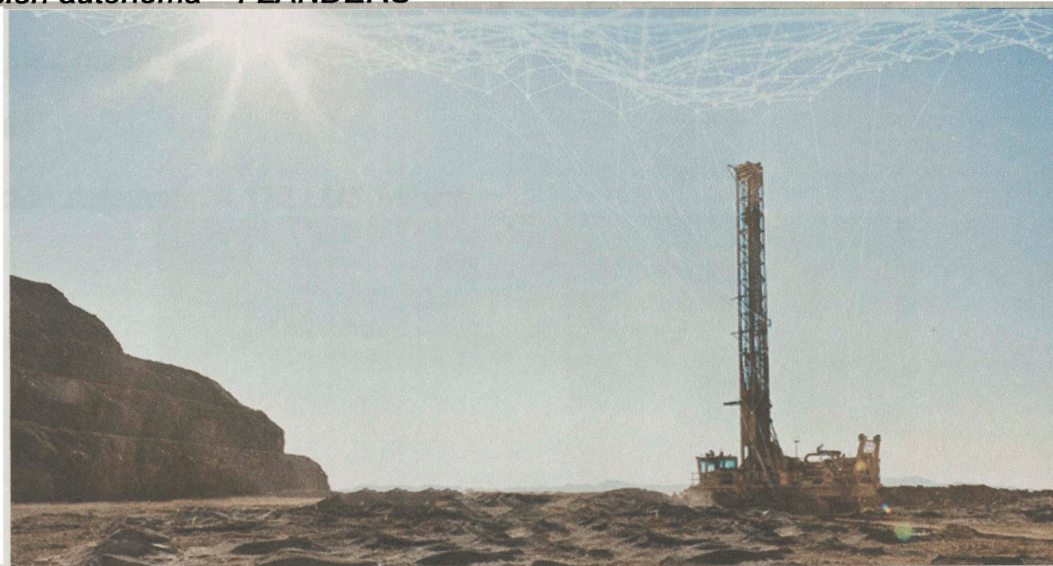
*Nota:* Adaptado de Hexagon

**FLANDERS:** Proporciona actualizaciones tecnológicas que convierten flotas de perforadoras manuales en máquinas avanzadas operadas de forma remota. Sus soluciones aseguran ciclos de operación consistentes, mantienen a los operadores fuera

de condiciones peligrosas y mejoran la adquisición de datos en tiempo real, lo que puede aumentar la productividad de la perforadora hasta en un 30%.

**Figura 2**

*Perforación autónoma – FLANDERS*



*Nota: Adaptado de FLANDERS*

**Epiroc:** Ha desarrollado equipos de perforación autónomos, como la serie Pit Viper, que permiten operaciones sin intervención humana directa. Empresas como IAMGOLD han implementado estas perforadoras autónomas en sus minas a cielo abierto, mejorando la seguridad al mantener a los operadores alejados de zonas de peligro potencial durante la perforación.

**Figura 3**

*Perforación autónoma – Epiroc*



*Nota: Adaptado de Epiroc*

**TELLUS Mining:** Ofrece el Sistema de Perforación Autónoma (ADS), que permite operar equipos de perforación de manera autónoma. Este sistema ingresa secuencias de perforación que se desarrollan de manera continua bajo supervisión, pero sin la intervención directa de un operador, optimizando la eficiencia y seguridad en las operaciones mineras.

#### **Figura 4**

*Perforación autónoma – TELLUS Mining*



*Nota:* Adaptado de TELLUS Mining

#### **2.1.8 Componentes de la perforación autónoma**

La perforación autónoma en minería a cielo abierto involucra la integración de diversos componentes tecnológicos diseñados para operar en conjunto y optimizar el proceso. Estos son algunos de los principales componentes:

**Sistemas de control automático:** Los sistemas de control automático gestionan la operación de la perforadora sin intervención directa del operador. Estos sistemas incluyen algoritmos avanzados que ajustan los parámetros de perforación en tiempo real, como la presión de impacto, la velocidad de rotación y la profundidad alcanzada

**Sensores y actuadores.** Sensores como los de presión, velocidad, torque y posición son fundamentales para monitorear el estado de la máquina y el terreno. Los actuadores, a su vez, responden a las señales del sistema de control para ajustar los movimientos de la perforadora.

**Sistemas de navegación y posicionamiento.** Utilizan tecnologías GPS y sistemas de mapeo digital para garantizar que la perforadora siga rutas predeterminadas y coloque los barrenos en las ubicaciones exactas del plan de perforación. Esto mejora la precisión y la calidad del trabajo realizado.

**Interfaces de supervisión y monitoreo remoto.** Estas interfaces permiten a los operadores monitorear y controlar múltiples equipos desde una sala de control. Los datos en tiempo real proporcionan información crítica sobre el desempeño de las perforadoras y las condiciones del terreno.

**Software de planificación y optimización.** Herramientas como los sistemas ADS (*Autonomous Drill System*) permiten la integración de los planes de perforación con los sistemas autónomos. Estos programas ajustan automáticamente las configuraciones de perforación para cumplir con los objetivos del proyecto.

**Plataformas de análisis de datos.** Los datos recolectados durante las operaciones son analizados mediante plataformas especializadas para identificar patrones, mejorar procesos y reducir costos. Esto incluye información sobre tiempos de inactividad, rendimiento del equipo y calidad de los barrenos.

**Redes de comunicación y conectividad:** Las perforadoras autónomas están conectadas a redes de comunicación para enviar datos en tiempo real a las estaciones de monitoreo o al sistema central de control. Esto permite la supervisión remota de las perforadoras, asegurando una respuesta rápida ante cualquier anomalía o ajuste necesario.

### **2.1.9 Criterios de evaluación de rendimiento**

En el análisis del rendimiento de los sistemas de perforación, así como para la selección del equipo más adecuado para condiciones geológicas específicas, se deben tener en cuenta diversos factores. Estos criterios permiten comparar y evaluar la eficiencia de los equipos bajo diferentes circunstancias operativas. A continuación, se presentan los principales criterios de evaluación:

**Tasa de penetración (ROP - Rate of Penetration).** La tasa de penetración mide la cantidad de roca perforada por unidad de tiempo y es un indicador directo de la eficiencia del proceso. Es influenciada por parámetros como la dureza de la roca, la calidad de la broca y los ajustes operativos. Una mayor tasa de penetración implica mayor productividad. (Sandvik Mining Handbook, 2020).

**Porcentaje de utilización del equipo.** Este criterio evalúa el tiempo efectivo de operación respecto al tiempo total disponible. Permite identificar pérdidas de tiempo por inactividad, demoras o mantenimiento. (Hoek, E., et al., 2007).

**Costo de perforación (TDC – Total Drilling Cost).** Este criterio abarca los costos asociados a los tres factores anteriores. Un sistema de perforación que combine un alto rango de penetración, una mayor vida útil de las brocas y un bajo consumo de energía puede generar una productividad considerablemente mayor, lo que lleva a una reducción en el costo total de perforación (TDC, por sus siglas en inglés). El costo total de perforación se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$TDC = \frac{O\&O\ Cost}{PR \times Eff} + \frac{COB}{LOB} \quad (5)$$

Donde:

TDC: Costo Total de Perforación (\$/m)

O & O Cost: Costo de Operación y Propiedad (\$/h)

PR: Rango de Penetración (m/h)

Eff: Eficiencia de la perforadora (%)

COB: Costo de la broca (\$)

LOB: Vida útil de la broca (m)

**Costo de perforación por metro (DC - Drilling Cost per Meter).** Representa el costo total asociado con perforar un metro de material. Es fundamental para la evaluación económica de proyectos de perforación. (Brady, B. et al., 2007).

$$DC = \frac{TDC}{L_{total}} \quad (6)$$

Donde:

DC: Costo de perforación (\$/m)

TDC: Costo total de perforación (\$)

Ltotal: Longitud total perforada (m)

**Precisión de perforación.** Evalúa el cumplimiento de las especificaciones de diseño (profundidad y dirección). Una perforación precisa minimiza la dilución y maximiza la recuperación del mineral. (Atlas Copco Manual Técnico, 2018).

**Consumo energético específico.** Indica la energía requerida para perforar una unidad de longitud. Permite optimizar el uso energético y reducir costos operativos. (Sandvik Mining Handbook, 2020).

$$E = \frac{P}{ROP} \quad (7)$$

Donde:

E: Energía específica (kWh/m)

P: Potencia del equipo (kW)

ROP: Tasa de penetración (m/h)

**Vida Útil de las Herramientas.** Este criterio mide el desgaste de componentes clave, como brocas y martillos, en función de la cantidad de material perforado. Una vida útil mayor reduce costos de reposición y tiempos de inactividad. (Atlas Copco Manual Técnico, 2018).

**Rendimiento de la Broca.** Evalúa la eficiencia de la broca en términos de longitud perforada antes de requerir reemplazo. Relaciona directamente los costos operativos con la selección de herramientas. (Hoek, E., 2000).

$$RB = \frac{L_{perforada}}{N_{brocas}} \quad (8)$$

Donde:

RB: Rendimiento de la broca (m/broca)

Lperforada: Longitud total perforada (m)

Nbrocas: Número de brocas usadas

### 2.1.10 Productividad de perforación

La perforación, como cualquier proceso operativo, forma parte de un ciclo de mejora continua. Un aspecto crucial dentro de este ciclo es la productividad, que se mide de manera cuantitativa en términos de toneladas producidas por hora cronológica (t/h). Este valor depende de diversas variables, que se describen a continuación:

#### Indicadores de Productividad Operacional (KPIs)

**Disponibilidad física (%):** Este indicador refleja el porcentaje de horas disponibles para la producción en relación con las horas programadas, permitiendo evaluar la capacidad operativa del equipo de perforación.

**Utilización (%):** Mide el porcentaje de horas brutas (motor encendido en operación) utilizadas frente a las horas disponibles del equipo.

**Eficacia (%):** Representa la proporción de horas netas destinadas a la producción en comparación con las horas brutas utilizadas.

**Eficiencia (%):** Producto de la Disponibilidad Física, Utilización y Eficacia. Indica el porcentaje de horas netas de perforación frente a las horas programadas.

**Rango de penetración (m/h):** Este indicador mide la longitud perforada por unidad de tiempo y es resultado de la interacción entre variables operativas (presión, rotación, barrido) y las características de la roca perforada (e.g., cuarcita, magnetita, andesita).

**Factor de perforabilidad (t/m):** Relaciona las toneladas a volar por cada metro lineal perforado, considerando factores geométricos como burden, espaciamiento, subdrilling, tipo de malla (triangular, rectangular), y la densidad de la roca.

La productividad de perforación se calcula mediante la fórmula:

$$Productividad = P.R. \times Eff \times F.P. \quad (9)$$

Donde:

P.R.: Rango de penetración (m/h netas).

Eff.: Eficiencia (%).

F.P.: Factor de perforabilidad (t/m).

## **Indicadores de Productividad de Mantenimiento**

**Disponibilidad mecánica (%):** Relaciona las horas de mantenimiento con las horas brutas de operación, evaluando la capacidad técnica del equipo para operar sin interrupciones.

**Tiempo medio entre fallas (MTBF):** Representa el intervalo promedio entre la puesta en marcha y la aparición de una falla. Un valor alto indica mayor confiabilidad del equipo.

**Tiempo medio para reparar (MTTR):** Indica el tiempo promedio necesario para reparar un equipo y devolverlo a condiciones óptimas de operación. Este indicador mide la eficacia en la ejecución de mantenimiento correctivo.

**Confiabilidad:** Probabilidad de que el equipo cumpla con su función específica sin fallas durante un periodo de tiempo dado, relacionada con la tasa de fallas y el MTBF.

La confiabilidad puede calcularse mediante la fórmula:

$$\text{Confiabilidad} = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Donde:

$\lambda$ : Tasa de fallas.

t: Intervalo de tiempo operativo.

e: Base del logaritmo natural (e=2.7182).

## **Distribución de Horas de Perforadora**

La eficiencia operativa de un equipo rara vez alcanza el 100%, debido a múltiples factores que afectan la productividad máxima. Para gestionar las horas operativas, se clasificarán según el H-TUM (Modelo Armonizado de Utilización de Tiempos)

**Tabla 1**

**H – TUM Modelo Armonizado de Tiempos**

<b>Categoría o Subcategoría</b>	<b>Elemento</b>	<b>Definición</b>
<b>Tiempo Operativo (TO)</b>	<b>Tiempo Operativo Dinámico (OD)</b>	Se relaciona con el tiempo que el equipo está realizando su función de producción primaria a plena capacidad, también se conoce como tiempo de giro en excavadoras de rajo abierto.
	<b>Tiempo Operativo No-Dinámico (ON)</b>	Se captura cuando el equipo está realizando una tarea secundaria fuera de los retrasos normales del proceso productivo.
<b>Tiempo Demoras Operativas (DO)</b>	<b>Demora de Proceso (DP)</b>	Cubre las paradas de equipo que se consideran parte del proceso de producción normal o de la tarea operativa planificada.
	<b>Demora No Planificada (DNP)</b>	Cubre las paradas de equipo que no se consideran parte del proceso de producción normal o de la tarea operativa planificada. Estos eventos son de corta duración.
	<b>Demora Laboral (DL)</b>	Permite el registro de cualquier retraso causado por ausencia del operador: cambio de turno, información / reuniones / capacitación, descansos o pruebas de drogas y alcohol.
	<b>Demora Reserva (DR)</b>	Se reservan para instalaciones y equipos que no son necesarios para su uso y generalmente se planifican. Estos retrasos pueden etiquetarse como no requeridos o sin producción programada.
	<b>Demora Consecuente (DC)</b>	Son eventos que ocurren fuera del equipo o área que se está midiendo, pero dentro del límite del sitio.
<b>Tiempo Mantenimiento (TM)</b>	<b>Mantenimiento Planificado (MP)</b>	Cualquier mantenimiento programado, corte o parada programada, rutina de servicio o actividad de inspección planeada que quepa en la ventana/programa actual de mantenimiento.
	<b>Mantenimiento Operacional No Planificado (MNP)</b>	Este elemento intenta capturar eventos en donde ha habido daño accidental provocado por un operador a un equipo móvil.
<b>Mantenimiento No Planificado (MNP)</b>	<b>Tiempo Mantenimiento Eléctrico No Planificado (ME) &amp; Tiempo Mantenimiento Mecánico No Planificado (MM)</b>	Se reserva para todas las interrupciones, fallas eléctricas o mecánicas, errores eléctricos, cambios no planificados de componentes y eventos de mantenimiento que interrumpen cualquier tarea, planeada o no planeada, que no estaba originalmente en la Ventana programada de mantenimiento
	<b>Tiempo Demoras Externas (TDE)</b>	<b>Demora Clima Externa (CE)</b> <b>Demora Eléctrica Externa (EE)</b> <b>Otra Demora Externa (OE)</b>

*Nota:* Adaptado de modelo TUM Glencore.

## 2.2 Marco conceptual

*Perforación*, proceso esencial en minería superficial que consiste en crear orificios en la roca para introducir explosivos o recolectar muestras, influyendo directamente en la productividad y eficiencia de las operaciones mineras. (Hustrulid y Kuchta, 2013)

*Automatización*, incorporación de tecnologías que permiten la realización de procesos con mínima intervención humana. En minería, la automatización en perforación implica el uso de equipos avanzados equipados con navegación, control remoto y análisis de datos en tiempo real. (International Society of Automation (ISA), 2010)

*Manual*, se refiere a los procesos que dependen directamente de la intervención humana. En perforación, el término se asocia con equipos operados manualmente, con dependencia absoluta del operador. (Bhandari, 2008)

*Autónomo*, sistemas o equipos que operan de forma independiente, con mínima o nula intervención humana. Utilizan tecnologías como sensores, sistemas de navegación y análisis en tiempo real para optimizar tareas complejas en minería. (Hustrulid y Kuchta, 2013)

*KPIs*, los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) son métricas utilizadas para evaluar la efectividad y eficiencia de las operaciones. En perforación, incluyen: metros perforados por hora, porcentaje de tiempo operativo y consumo energético por metro perforado. (Ouchterlony, 1992)

*Eficiencia*, relación entre los recursos utilizados y los resultados obtenidos. En perforación, implica maximizar metros perforados en menor tiempo, reduciendo errores y consumos. (Hustrulid y Kuchta, 2013)

*Disponibilidad*, porcentaje de tiempo en que un equipo está operable y listo para ser utilizado en las operaciones. Es un factor crucial para asegurar la continuidad de las actividades mineras. (Hustrulid y Kuchta, 2013)

*Seguridad*, aspecto crítico en minería, orientado a minimizar riesgos y proteger la integridad de los trabajadores involucrados en las operaciones. (Agencia Nacional de Minería, 2015)

*Sostenibilidad*, ejecución de operaciones con impacto ambiental mínimo, promoviendo prácticas responsables. En perforación, esto incluye la reducción de emisiones contaminantes y el uso eficiente de recursos. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019)

*Transformación*, integración de tecnologías digitales como IoT, sensores avanzados y análisis de datos en operaciones mineras, permitiendo supervisión en tiempo real y ajuste dinámico de parámetros. (Ministerio de Industria, Innovación y Ciencia de Australia, 2011)

*Optimización*. Proceso de ajustar continuamente los parámetros de perforación para maximizar la productividad y minimizar costos. (Machines, 2024)

*Rendimiento*, métrica que considera velocidad de perforación, durabilidad de los componentes y tasa de utilización del equipo. (Hustrulid y Kuchta, 2013)

*Capacitación*, programas de formación necesarios para que los trabajadores puedan operar y mantener los sistemas automatizados de manera eficiente y segura. (Ministerio de Industria, Innovación y Ciencia de Australia, 2011)

*Estandarización*, establecimiento de procesos uniformes en las operaciones mineras, reduciendo la variabilidad en resultados y garantizando un rendimiento predecible. (Iniciativa para la Minería Responsable (IRMA), 2018)

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1 Metodología del estudio

#### 3.1.1 Tipo y diseño de la investigación

El estudio es de tipo cuantitativo y aplicado, orientado a analizar datos operativos de perforadoras para medir el impacto de la transición de manuales a autónomas

Se utiliza un diseño longitudinal, basado en el análisis de datos históricos y actuales recopilados de sistemas operativos, permitiendo evaluar el desempeño en diferentes periodos.

#### 3.1.2 Unidad de análisis

La Compañía Minera Antapaccay se encuentra en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, región Cusco a una distancia aproximada de 256km. Al SE de Cusco y 265 km. NE de Arequipa a una altitud aproximada de 4,200 m.s.n.m. El acceso a la mina se realiza a través de diferentes rutas que conectan las principales ciudades cercanas (Cusco y Arequipa) con el área de operaciones. Consta de dos tajos: Tajo Norte y Sur, como se muestra en la siguiente figura:

#### Figura 5

*Ubicación de los 2 tajos U.M. Antapaccay*



*Nota: Adaptado de Google Earth 2024 en base a coordenadas*

La ruta desde Cusco incluye un tramo asfaltado hasta Espinar y un tramo final de trocha hacia la mina, como muestra la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Vías de acceso a Compañía Minera Antapaccay – Cusco*

Tramo	Distancia (km)	Tipo de Vía	Tiempo Estimado
Cusco – Sicuani	140	Asfaltada	3 h
Sicuani – Espinar	80	Asfaltada	1 h 30 min
Espinar – Compañía Minera Antapaccay	36	Trocha	1 h

*Nota:* Elaboración propia

La ruta desde Arequipa incluye tramos asfaltados hasta Espinar y un tramo de trocha hacia la mina, como se detalla a continuación:

**Tabla 3**

*Vías de acceso a Compañía Minera Antapaccay – Arequipa*

Tramo	Distancia (km)	Tipo de Vía	Tiempo Estimado
Arequipa – Imata	176	Asfaltada	3 h 30 min
Imata – Espinar	53	Asfaltada	1 h 20 min
Espinar – Compañía Minera Antapaccay	36	Trocha	1 h

*Nota:* Elaboración propia

La ruta desde Arequipa incluye tramos asfaltados hasta Espinar y un tramo de trocha hacia la mina, como se detalla a continuación.

### **3.1.3 Equipos de perforación**

En el presente estudio se analizarán las perforadoras utilizadas en los tajos Norte y Sur de la Unidad Minera Antapaccay.

Las perforadoras estudiadas forman parte de una flota diseñada para operar en condiciones extremas, a una altitud promedio de 4,200 m.s.n.m., con un clima que varía entre frío seco y temperaturas bajo cero. Estas condiciones requieren equipos de alta precisión y confiabilidad, tanto en su desempeño técnico como en su capacidad de adaptarse a las necesidades de la mina. Los modelos analizados se muestran en la siguiente tabla resumen:

**Tabla 4**

*Perforadoras en Compañía Minera Antapaccay*

<b>Modelo</b>	<b>Código mina</b>	<b>Tipo</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Perforación</b>
MD6640	D4101	Rotativa	Eléctrica	Primaria
MD6640	D4102	Rotativa	Eléctrica	Primaria
P&H320XPC	D4103	Rotativa	Eléctrica	Primaria
PIT VIPER 351	D4104	Rotativa	Eléctrica	Primaria
MD6540	D4132	Rotativa	Diesel	Primaria

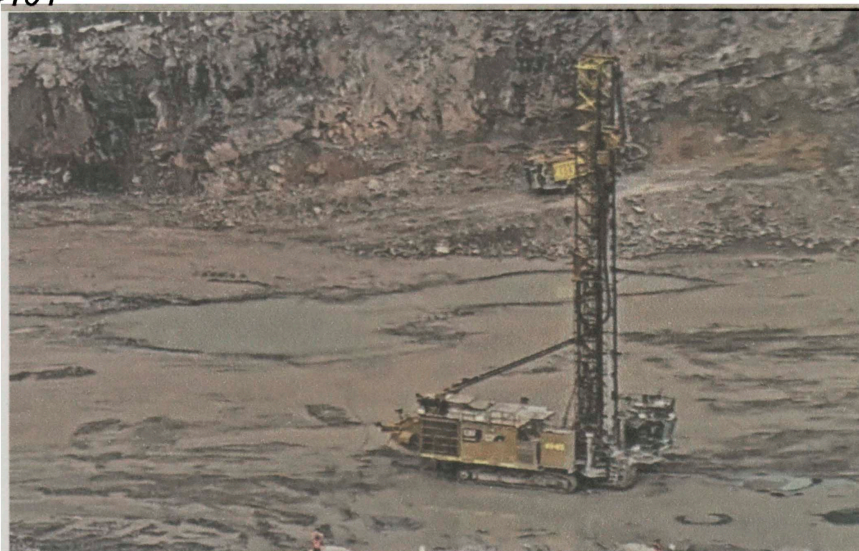
*Nota:* Elaboración propia

**3.1.3.1 Perforadoras eléctricas.**

- **CAT MD6640 – Caterpillar Inc. (D4101 y D4102).** Perforadora rotativa de accionamiento eléctrico diseñada para operaciones de minería a cielo abierto. Destaca por su durabilidad y rendimiento en condiciones ambientales adversas.

**Figura 6**

*Perforadora D4101*



*Nota:* Elaboración propia

## Figura 7

### Perforadora D4102



Nota: Elaboración propia

## Tabla 5

### Especificaciones técnicas CAT MD6640

CAT MD6640		
<b>Especificaciones técnicas</b>	<b>Diámetro de perforación</b>	244 a 406 mm (9,6 a 16 pulgadas)
	<b>Profundidad en una pasada</b>	18,3 a 21,3 m (60 a 70 pies).
	<b>Profundidad máxima</b>	Hasta 85,3 m (280 pies)
	<b>Carga sobre la broca</b>	Hasta 64.000 kg (141.096 lb).
	<b>Motor eléctrico</b>	Potencia de 522 - 746 kW (600 HP)
	<b>Peso operativo</b>	Aproximadamente 154.000 kg (339.512 lb)
<b>Características destacadas</b>	<p>Tren de rodaje, tipo excavadora, proporciona durabilidad y estabilidad en terrenos difíciles.</p> <p>Cabina espaciosa y montada sobre aisladores para reducir vibraciones, con amplia visibilidad y asiento ergonómico ajustable.</p> <p>Sistema de filtración auto limpiante y unidad presurizada para mantener un ambiente óptimo en los sistemas eléctricos y de maquinaria.</p> <p>Adaptabilidad climática, equipada para operar en temperaturas que oscilan entre -40 °C y 50 °C, y en altitudes de hasta 5.200 m</p>	
<b>Aplicación principal</b>	Ideal para perforaciones en tajos profundos y terrenos de alta dureza, ofreciendo eficiencia operativa y reducción de costos a largo plazo.	

Nota: Adaptado de Caterpillar Inc.

- **P&H320XPC – Komatsu Mining Corp. (D4103).** Perforadora eléctrica rotativa reconocida por su tecnología avanzada y capacidad para optimizar los ciclos de perforación, reduciendo los costos operativos.

**Figura 8**

*Perforadora D4103*



*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 6**

*Especificaciones técnicas P&H320XPC*

<b>P&amp;H320XPC</b>											
<b>Especificaciones técnicas</b>	<table border="1"> <tr> <td><b>Diámetro de perforación</b></td> <td>270 a 444 mm. (de 10 5/8 a 17 ½ pulg.)</td> </tr> <tr> <td><b>Profundidad en una pasada</b></td> <td>19,8 m. (65 pies)</td> </tr> <tr> <td><b>Profundidad máxima</b></td> <td>Hasta 59,4 m</td> </tr> <tr> <td><b>Motor eléctrico</b></td> <td>600 kW</td> </tr> <tr> <td><b>Peso operativo</b></td> <td>Aproximadamente 200.000 kg</td> </tr> </table>	<b>Diámetro de perforación</b>	270 a 444 mm. (de 10 5/8 a 17 ½ pulg.)	<b>Profundidad en una pasada</b>	19,8 m. (65 pies)	<b>Profundidad máxima</b>	Hasta 59,4 m	<b>Motor eléctrico</b>	600 kW	<b>Peso operativo</b>	Aproximadamente 200.000 kg
<b>Diámetro de perforación</b>	270 a 444 mm. (de 10 5/8 a 17 ½ pulg.)										
<b>Profundidad en una pasada</b>	19,8 m. (65 pies)										
<b>Profundidad máxima</b>	Hasta 59,4 m										
<b>Motor eléctrico</b>	600 kW										
<b>Peso operativo</b>	Aproximadamente 200.000 kg										
<b>Características destacadas</b>	<p>Sistema de control adaptativo, ajusta los parámetros de perforación en tiempo real para maximizar la eficiencia.</p> <p>Monitoreo en tiempo real, permite supervisar y ajustar las operaciones para mejorar el rendimiento.</p> <p>Cabina con diseño ergonómico y controles intuitivos.</p>										
<b>Aplicación principal</b>	Adecuada para perforaciones en operaciones mineras de gran escala, especialmente en terrenos de roca dura.										

*Nota:* Adaptado de Komatsu Mining Corp.

- **PIT VIPER 351 – Epiroc (D4104).** Perforadora rotativa con accionamiento eléctrico ampliamente utilizada en minería a cielo abierto, conocida por su capacidad para perforaciones de gran diámetro y profundidad. Su tecnología avanzada permite un alto rendimiento y eficiencia.

**Figura 9**

*Perforadora D4104*



Nota: Elaboración propia

**Tabla 7**

*Especificaciones técnicas PIT VIPER 351*

<b>PIT VIPER 351</b>		
<b>Especificaciones técnicas</b>	<b>Diámetro de perforación</b>	207 mm a 406 mm (8,5 a 16 pulgadas)
	<b>Profundidad en una pasada</b>	19,8 m (65 pies)
	<b>Profundidad máxima</b>	41,1 m
	<b>Capacidad de empuje</b>	Hasta 534 kN
	<b>Motor eléctrico</b>	1.044 kW
	<b>Peso operativo</b>	Aproximadamente 188.000 kg
<b>Características destacadas</b>	<p>Sistema de control RCS (Rig Control System), proporciona automatización y gestión de información para mejorar la seguridad y productividad.</p> <p>Cabina espaciosa diseñada para el confort del operador, con controles ergonómicos y amplia visibilidad.</p> <p>Capacidad para perforar en condiciones de roca dura, optimizando la productividad en operaciones</p>	

---

exigentes.

---

**Aplicación principal**

Especialmente diseñada para perforaciones en roca dura y operaciones que requieren barrenos de gran diámetro.

---

*Nota:* Adaptado de Epiroc

### 3.1.3.2 Perforadora diésel.

- **CAT MD6540 – Caterpillar Inc. (D4132).** Perforadora diésel rotativa diseñada para ofrecer movilidad y potencia en operaciones mineras, especialmente en áreas con acceso limitado a energía eléctrica.

## Figura 10

*Perforadora D4132*



*Nota:* Elaboración propia

## Tabla 8

*Especificaciones técnicas CAT MD6540*

CAT MD6540		
<b>Especificaciones técnicas</b>	<b>Diámetro de perforación</b>	229 a 381 mm (9 a 15 pulgadas)
	<b>Profundidad en una pasada</b>	19,86 m (65 pies)
	<b>Profundidad máxima</b>	Hasta 65,58 m (215 pies)
	<b>Motor diésel</b>	Potencia de 1.500 HP
	<b>Peso operativo</b>	Aproximadamente 150.000 kg
<b>Características destacadas</b>	Sistema hidráulico avanzado que permite perforaciones precisas en diversas condiciones geológicas.	

	<p>Diseño robusto capaz de operar en diversos tipos de terreno y condiciones climáticas adversas.</p> <p>Cabina ergonómica equipada con controles de fácil manejo para el operador.</p>
<b>Aplicación principal</b>	Ideal para operaciones en áreas remotas donde la infraestructura eléctrica es limitada, ofreciendo una solución eficiente

*Nota:* Adaptado de Caterpillar Inc.

### **3.1.4 Etapas de la investigación**

La investigación consistirá en la recopilación de datos provenientes de las perforadoras manuales y autónomas. Esta información incluirá métricas operativas y costos registrados en tiempo real por los sistemas de monitoreo integrados. Además, se utilizarán datos históricos almacenados en bases como SQL y en sistemas empresariales como SAP.

Para el procesamiento de los datos, se emplearán herramientas como Python y Excel, que permitirán organizar y analizar la información de manera eficiente. Este proceso incluirá la limpieza y transformación de los datos para calcular indicadores clave relacionados con productividad, costos y seguridad.

El análisis de la información se realizará mediante técnicas estadísticas en softwares como Minitab, buscando identificar patrones, validar hipótesis y generar conclusiones que respalden la evaluación del impacto de la transición hacia perforadoras autónomas. Este enfoque garantizará un estudio fundamentado y basado en datos reales.

**Figura 11**

*Etapas de la aplicación de la metodología*



*Nota:* Elaboración propia

### **3.2 Variables e indicadores**

Para la correcta evaluación del impacto de la transición de perforadoras manuales a autónomas, es fundamental establecer las variables e indicadores clave que permitirán medir y analizar los resultados de manera objetiva y cuantificable. A continuación, se detallan las variables y los indicadores definidos para el estudio.

#### **3.2.1 Variable independiente**

**Transición tecnológica:** Se refiere al cambio de un sistema de perforación manual a uno autónomo, evaluando su influencia como variable principal en los resultados operativos.

### **3.2.2 Variables dependientes**

Estas variables están directamente influenciadas por la tecnología empleada y reflejan los resultados obtenidos en términos de productividad, costos y seguridad:

- **Eficiencia:** Representa el rendimiento operativo logrado en cada unidad de tiempo.
- **Costos:** Refleja el impacto económico asociado a la operación de las perforadoras, considerando recursos utilizados y resultados obtenidos.
- **Seguridad:** Evalúa el nivel de riesgo y bienestar del personal durante las operaciones. Considera no solo los eventos reportados, sino también la **exposición al riesgo** del operador.

### **3.2.3 Indicadores**

Los siguientes indicadores han sido definidos para evaluar de manera integral el desempeño de las perforadoras y la eficacia de la transición.

- **Metros perforados por hora (m/h):** Permite evaluar la eficiencia operativa del sistema, reflejando el ritmo de avance por unidad de tiempo.
- **Costo promedio por metro perforado (\$/m):** Mide la eficiencia económica, integrando los costos operativos asociados a cada metro perforado.
- **Número de incidentes reportados:** Cuantifica los eventos de seguridad ocurridos durante la operación. Este indicador permite evaluar el impacto de la automatización en la reducción de riesgos para el personal y la mejora de las condiciones de seguridad.

## **3.3 Fuentes de Datos**

### **3.3.1 Fuentes Primarias:**

Corresponden a los datos operativos recolectados directamente desde los sistemas de monitoreo y control en tiempo real, tales como:

- **Dispatch®:** Datos sobre demoras, uso de equipos, productividad y posicionamiento.

- **Sistema ARDVARC:** Información sobre tiempos de ciclo, uso de equipos, parámetros operativos y condiciones en campo (posicionamiento, inclinación, etc).
- **Torsa Cloud:** Datos relacionados con la gestión operativa, eventos críticos y alertas de seguridad.

### 3.3.2 Fuentes Secundarias

Incluyen información recopilada previamente y almacenada en registros internos, como:

- Reportes de incidentes y eventos de seguridad.
- Bases de datos internas con antecedentes sobre eficiencia, costos y desviaciones.

### 3.4 Instrumentos de recolección

Para garantizar una captura precisa, consistente y representativa de los datos necesarios para este estudio, se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Sistemas de monitoreo en tiempo real:** Integración de plataformas como **Sistema ARDVARC, Dispatch® y Torsa Cloud**, que permiten la recolección continua de datos operacionales como tiempos de ciclo, rendimiento por equipo, ubicaciones GPS y eventos de seguridad.
- **Reportes automatizados de las perforadoras:** Informes generados por los sistemas de control de las perforadoras, incluyendo logs de operación, registro de metros perforados, tiempos activos, demoras de mantenimiento y desempeño técnico individual por unidad.
- **Informes de seguridad:** Revisión de informes con percepciones sobre el cambio tecnológico, condiciones laborales, usabilidad del sistema autónomo y percepción de seguridad.

## **3.5 Recolección de datos**

### **3.5.1 Procedimiento de recolección de datos**

La recolección de datos se desarrolló mediante un procedimiento estructurado, enfocado en asegurar la integridad y trazabilidad de la información desde su origen. Este proceso contempló las siguientes etapas.

- **Identificación de las fuentes de información:** Se determinaron los sistemas, plataformas y repositorios que contenían los datos relevantes, diferenciando entre fuentes primarias (como sistemas de monitoreo y plataformas operativas) y secundarias (reportes, registros históricos y bases de datos complementarias)
- **Configuración de los sistemas de captura:** Se ajustaron los parámetros en los sistemas de monitoreo para garantizar que los datos recolectados sean completos, con la frecuencia y el nivel de detalle requeridos.
- **Extracción de datos:** Se implementaron mecanismos para la exportación directa desde los sistemas fuente, utilizando APIs, queries o consultas específicas, según el entorno tecnológico de origen.
- **Almacenamiento inicial:** Los datos recolectados fueron almacenados en entornos digitales estructurados, resguardando su integridad y organización preliminar para facilitar su posterior análisis.
- **Comparabilidad temporal:** Aseguramiento de que los datos abarquen dos periodos claves:

**Pre-transición:** Datos históricos bajo el sistema manual.

**Post-transición:** Operación bajo condiciones autónomas.

### **3.5.2 Cronograma de implementación de la transición**

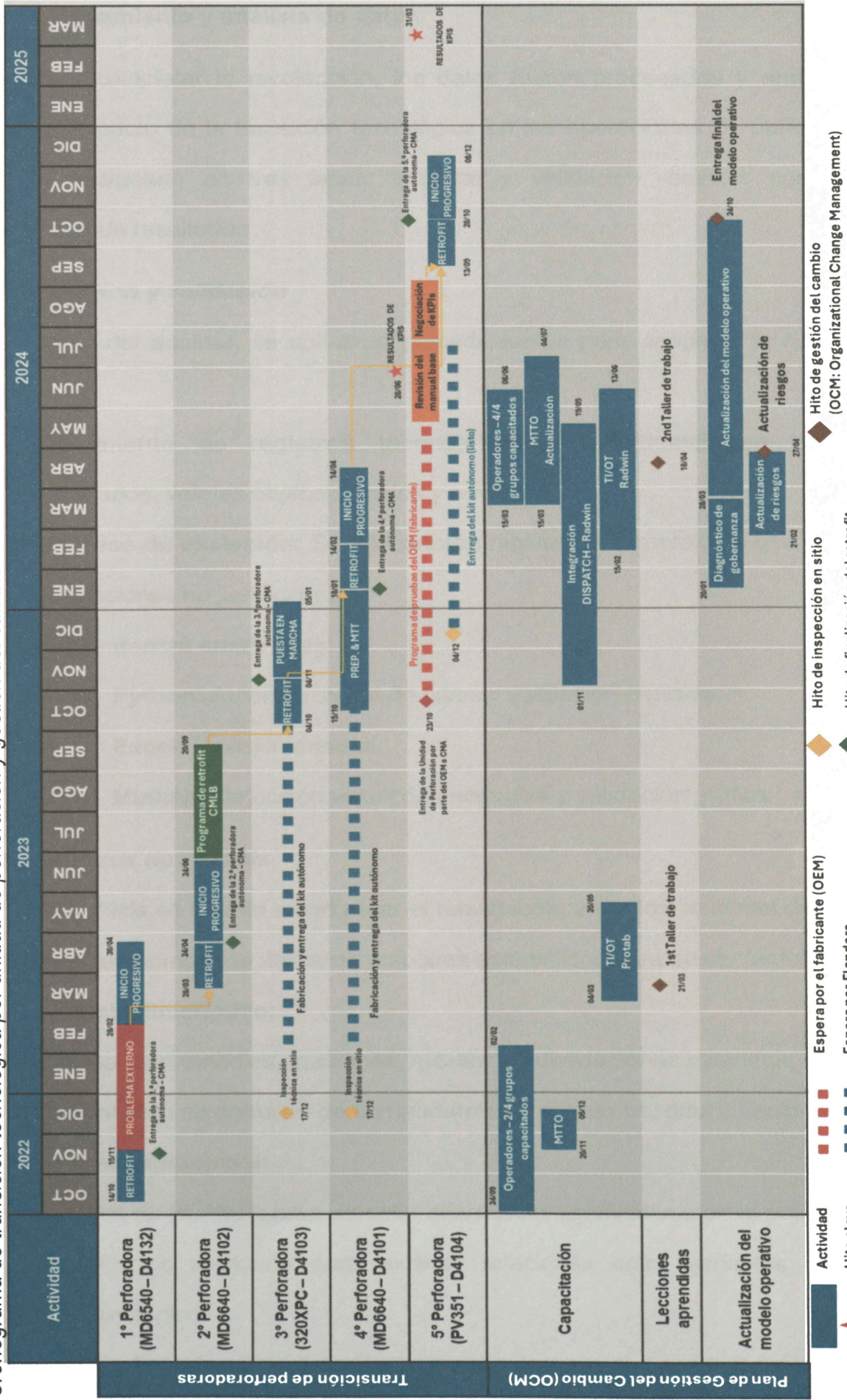
Para una ejecución ordenada y progresiva del proceso de transición de perforadoras manuales a sistemas autónomos, se elaboró un cronograma detallado. Este cronograma permitió visualizar de forma estructurada las fases técnicas y operativas

asociadas a cada unidad de perforación, asegurando una implementación escalonada y con seguimiento riguroso.

El plan contempló las fechas específicas en que cada perforadora inició su periodo de transición tecnológica (*retrofit*), así como las actividades claves para completar la gestión del cambio que incluye la capacitación del personal.

Figura 12

Cronograma de transición tecnológica por unidad de perforación y gestión del cambio



### 3.6 Procesamiento y análisis de datos

Tras completar la recolección, los datos fueron procesados y analizados para evaluar el impacto de la transición tecnológica en las operaciones de perforación. Esta etapa se estructuró en tres fases: limpieza y validación, análisis comparativo, y visualización de resultados.

#### 3.6.1 Limpieza y validación

Antes del análisis, se aplicaron procedimientos para asegurar la calidad de los datos:

- **Tratamiento de registros inconsistentes:** Se identificaron y corrigieron duplicados, valores atípicos, vacíos y errores.
- **Criterios de exclusión:** Se descartaron registros incompletos o que presentaban desviaciones no justificadas.
- **Herramientas empleadas:**
  - Python:** Automatización de filtros y validación cruzada.
  - Excel:** Revisión manual.
  - Minitab:** Detección visual de anomalías y validación gráfica de tendencias.

#### 3.6.2 Métodos de análisis

El análisis se orientó a comparar el rendimiento entre los sistemas de perforación manuales y autónomos. Se utilizaron enfoques estadísticos para sustentar los hallazgos:

- **Análisis descriptivo:**
  - Cálculo de promedios, medianas, máximos y desviaciones estándar.
  - Observación de patrones de comportamiento por turnos, días y equipos.
- **Análisis inferencial:**
  - Pruebas de hipótesis para detectar diferencias significativas entre periodos.
  - Modelos de regresión para explicar relaciones entre variables operativas y modalidad tecnológica.
  - Análisis de varianza para comparar grupos de equipos y condiciones de operación.

- **Comparación por periodos:** Evaluación de indicadores clave antes y después de la transición tecnológica, en ventanas temporales equivalentes para garantizar comparabilidad.

### 3.6.3 *Visualización y herramientas de soporte*

Para facilitar la interpretación de los resultados, se implementaron herramientas de visualización:

- **Gráficos comparativos:** Se utilizaron diagramas de barras, líneas, boxplots y mapas de calor para representar el comportamiento de KPIs.
- **Dashboards:**

**Dash (Python):** Visualización en tiempo real para validación operativa.

**Tableau y Power BI:** Análisis interactivo y reportes consolidados.

## 3.7 **Diseño del estudio longitudinal**

### 3.7.1 *Definición de períodos*

Para asegurar la consistencia temporal del análisis, se establecieron dos períodos diferenciados:

- **Período manual:** Operación exclusivamente con perforadoras manuales, utilizada como línea base para la comparación.
- **Período autónomo:** Implementación y consolidación del sistema autónomo. Este período incluye la etapa inicial de transición, en la que las perforadoras autónomas comenzaron a operar junto con las manuales, permitiendo observar los efectos del cambio tecnológico. Posteriormente, se alcanzó una operación completamente autónoma, evaluando su desempeño bajo el modelo consolidado.

### 3.7.2 *Métricas de evaluación*

Se analizaron variables clave, agrupadas en tres dimensiones principales:

- **Productividad:** Se midieron indicadores como disponibilidad, uso de disponibilidad, utilización, velocidad de penetración y rendimiento operativo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{T.\text{Disponible}(\text{Mina})}{T.\text{Trabajo}(\text{Mina}+\text{Mantenimiento})} \quad (11)$$

$$\text{Uso de disponibilidad} = \frac{T.\text{Operativo}(\text{Op. Dinámico}+\text{Op.No.Dinamico})}{T.\text{Disponible}} \quad (12)$$

$$\text{Utilización} = \frac{T.\text{Operativo}(\text{Op. Dinámico}+\text{Op.No.Dinamico})}{T.\text{Programado}} \quad (13)$$

$$\text{Velocidad de penetración} = \frac{\text{Metros Perforados}}{\text{Tiempo de Perforación Neta}} \quad (14)$$

$$\text{Rendimiento operativo} = \frac{\text{Metros Perforados}}{T.\text{Operativo}(\text{Op. Dinámico}+\text{Op.No.Dinamico})} \quad (15)$$

- **Reducción de costos:** Se analizaron variables como el costo por metro perforado, variación de uso de combustible y electricidad.
- **Mejora en seguridad:** Se evaluó la frecuencia y gravedad de los incidentes reportados, con especial énfasis en los eventos asociados a la interacción humana con el equipo de perforación.

### 3.8 Infraestructura tecnológica

La transición de perforadoras manuales a sistemas autónomos no solo implicó un cambio en la modalidad operativa, sino también una transformación profunda en la infraestructura tecnológica que sustenta dicha operación, la empresa que realizó este cambio fue Flanders. Esta sección describe los elementos técnicos clave que permitieron implementar, monitorear y analizar el desempeño de la perforación autónoma.

#### 3.8.1 Componentes del sistema de perforación autónoma

El sistema de perforación autónoma está compuesto por la perforadora, elementos internos y externos que trabajan en conjunto. A continuación, se detallan sus componentes:

- **Perforadora.** La perforadora es el núcleo del sistema, equipada con mecanismos de perforación, sistemas hidráulicos y motores eléctricos o diésel diseñados para soportar las condiciones más exigentes de las operaciones mineras. Su diseño incluye una estructura robusta y controles avanzados para ejecutar los patrones de perforación.

- **Elementos Internos.** Los elementos internos de la perforadora están diseñados para recopilar datos, facilitar la operación y garantizar la seguridad del proceso.

Incluyen:

**Sistema de Sensores:** Conjunto de sensores que monitorean parámetros críticos como presión, vibración, temperatura, y alineación del taladro para asegurar un rendimiento óptimo.

**Sistema de Navegación GPS y Antenas:** Proporcionan posicionamiento preciso y datos de orientación para ejecutar patrones de perforación específicos. Las antenas aseguran la conectividad y sincronización con los sistemas externos.

**LIDARs y Cámaras:** Sistemas de escaneo y monitoreo que generan mapas en tiempo real del terreno, detectan obstáculos y supervisan la operación visualmente para aumentar la seguridad.

**Luces de modo:** Indicadores visuales que comunican el estado operativo de la perforadora (en funcionamiento, en espera, en mantenimiento, etc.) a los operadores y personal en campo.

- **Elementos Externos.** Los elementos externos complementan el funcionamiento de la perforadora y garantizan la comunicación y control a distancia. Estos incluyen:

**Sala de Control:** Centro de operaciones desde donde se supervisa y controla la actividad de las perforadoras en tiempo real. Cuenta con interfaces gráficas, sistemas de alerta y herramientas de análisis.

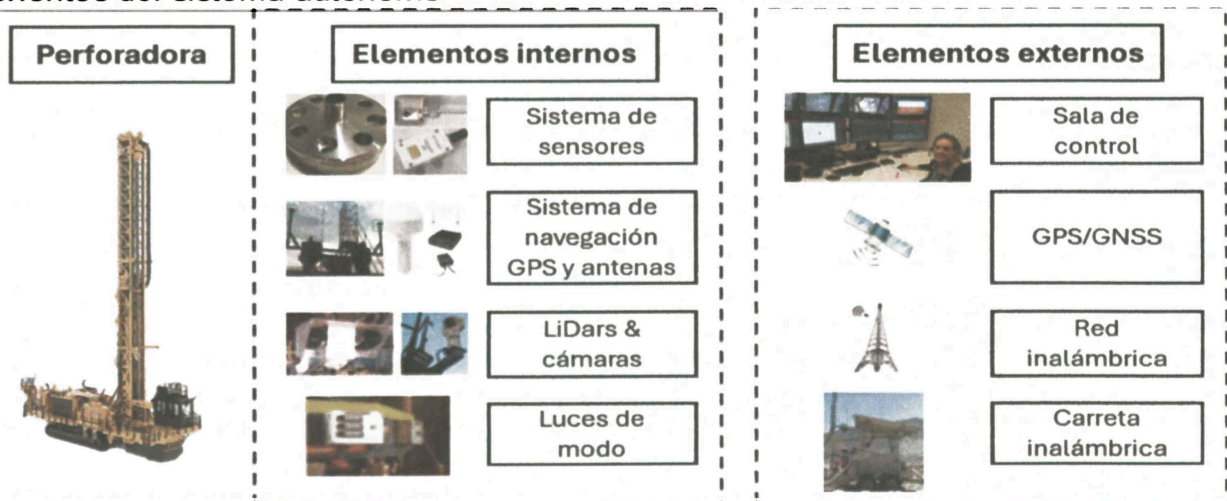
**GPS/GNSS:** Sistema de posicionamiento global que proporciona coordenadas geográficas precisas para la planificación y ejecución de los trabajos de perforación.

**Red Inalámbrica:** Infraestructura que conecta la perforadora con los sistemas de control remoto, transferencia de datos en tiempo real y comunicación entre equipos.

**Carreta Inalámbrica:** Unidad móvil que facilita la comunicación y el suministro eléctrico en ubicaciones remotas o de difícil acceso, asegurando la continuidad de las operaciones.

**Figura 13**

*Componentes del sistema autónomo*



Nota: Elaboración propia

### **3.8.2 Descripción de la tecnología**

**Red Radwin.** Es una solución de comunicación inalámbrica robusta diseñada específicamente para entornos industriales y mineros. Se utiliza para garantizar una conectividad estable y de alto rendimiento en áreas remotas y desafiantes. Su arquitectura permite soportar la transmisión de datos críticos en tiempo real, siendo fundamental para la implementación de tecnologías autónomas en minería.

#### **Características clave de la red Radwin:**

- **Conectividad de largo alcance:** La red es capaz de cubrir grandes distancias, lo que es ideal para operaciones mineras distribuidas en áreas extensas.
- **Alta velocidad de transmisión:** Permite enviar y recibir grandes volúmenes de datos con baja latencia, esencial para la comunicación entre equipos autónomos y los centros de control.
- **Fiabilidad en condiciones adversas:** Diseñada para resistir interferencias, polvo, vibraciones y temperaturas extremas, lo que la hace adecuada para entornos hostiles.
- **Seguridad en la transmisión de datos:** Ofrece protocolos avanzados de encriptación y protección contra accesos no autorizados.

**Aplicaciones en minería:** La red Radwin es esencial para la comunicación entre perforadoras autónomas, sistemas de monitoreo y salas de control. Facilita la transmisión de datos operativos, señales de navegación y alertas en tiempo real, garantizando operaciones eficientes. Su robustez la convierte en un pilar para la digitalización y automatización, integrando sistemas autónomos en las operaciones mineras.

### **3.8.3 Integración de sistemas**

Durante la etapa de transición, fue necesario garantizar la coexistencia y comunicación entre sistemas manuales y autónomos, lo cual implicó:

- **Compatibilización de plataformas:** Adaptaciones de software y hardware para asegurar que ambos tipos de equipos pudieran operar dentro del mismo ecosistema de control y monitoreo.
- **Sincronización de datos:** Establecimiento de protocolos de integración para que los datos capturados por sensores autónomos se alinearan con los sistemas manuales y fueran analizables de forma conjunta.
- **Gestión de tiempos de inactividad:** Implementación de rutinas de respaldo y recuperación para mitigar los efectos de interrupciones durante la migración tecnológica.

### **3.8.4 Desafíos técnicos**

Durante la implementación, se enfrentaron múltiples retos tecnológicos, entre ellos:

- **Interoperabilidad entre sistemas:** Dificultades al integrar equipos de diferentes fabricantes con plataformas analíticas existentes.
- **Gestión del volumen de datos:** Aumento significativo de la cantidad y frecuencia de datos recolectados, lo que exigió mejoras en almacenamiento, procesamiento y visualización.
- **Mantenimiento de conectividad:** Zonas con baja cobertura de red representaron un desafío para el monitoreo continuo de algunas unidades.

### **3.9 Aspectos éticos y consideraciones de seguridad**

La implementación de tecnologías autónomas en las operaciones mineras no solo implica consideraciones técnicas y operativas, sino que también plantea una serie de **retos éticos y de seguridad** que deben ser abordados adecuadamente para garantizar el éxito del proceso y el bienestar de todos los involucrados. En este sentido, es crucial que tanto la ética en el uso de datos como la **seguridad del personal** sean principios fundamentales a lo largo de toda la transición.

#### **3.9.1 Ética en el uso de datos**

La transición hacia sistemas autónomos genera datos operativos valiosos que deben ser gestionados con un enfoque ético y responsable para proteger tanto la información como los derechos de los involucrados.

- **Confidencialidad y privacidad:**

**Protección de datos:** Los datos operativos deben resguardarse bajo estrictas medidas de seguridad, cumpliendo normativas locales e internacionales, asegurando la privacidad de la información personal y operativa.

**Acceso restringido:** El acceso a la base de datos, alojada en un servidor SQL, estará limitado a personal autorizado. Se cuenta con un usuario y contraseña que garantizan la trazabilidad y la gestión correcta del acceso.

- **Uso responsable de los datos:**

**Propósito limitado:** La información se utilizará únicamente para fines operativos relacionados con eficiencia, seguridad y reducción de costos.

**Ética en el manejo:** Se evitará cualquier manipulación que pueda generar perjuicios, injusticias o malinterpretaciones.

#### **3.9.2 Seguridad del personal**

La seguridad del personal es esencial durante la transición a tecnologías autónomas. Aunque la automatización reduce ciertos riesgos, también introduce nuevos

desafíos. Se garantizará la protección de operadores y trabajadores involucrados en la recopilación de datos.

#### **Medidas para proteger a los operadores durante la transición:**

- Capacitación continua para interactuar con las perforadoras autónomas y seguir medidas de seguridad.
- Protocolos estrictos, como sensores de proximidad y zonas de seguridad física, para prevenir accidentes.
- Formación para emergencias y sistemas de monitoreo remoto para intervención oportuna.

### **3.10 Limitaciones del Estudio**

El estudio proporciona información clave sobre la transición a perforadoras autónomas en minería, pero presenta limitaciones que afectan la generalización de los resultados. Estas deben considerarse al interpretar conclusiones o formular recomendaciones. Las principales son:

#### **3.10.1 Restricciones en la calidad y disponibilidad de datos históricos**

El análisis histórico enfrentó varios desafíos derivados de diferencias en la estructura y acceso a los datos, además de cambios en la denominación y clasificación de demoras.

- **Cambio de denominación:** Anteriormente, las demoras se registraban según el sistema TUM y fue reemplazada por HTUM, lo que complicó la comparación directa y exigió un ajuste en los registros históricos.
- **Redistribución de demoras:** Las categorías de demoras fueron renombradas y reorganizadas, dificultando la alineación de datos previos con los nuevos esquemas de clasificación.
- **Restricción en datos de costos:** La información relacionada con costos resultó limitada, ralentizando la capacidad de realizar análisis financieros completos durante el periodo pre-implementación.

### **3.10.2 Interferencias externas y factores incontrolables**

El entorno operativo presentó factores externos que influyeron en los resultados del estudio. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Condiciones climáticas:** Lluvias, temperaturas extremas y tormentas impactaron el rendimiento y provocaron paradas no programadas, complicando la comparación entre perforadoras manuales y autónomas.
- **Factores económicos:** Las fluctuaciones en precios de metales e insumos alteraron la cantidad de perforadoras en operación y las decisiones estratégicas.

### **3.10.3 Limitaciones tecnológicas en la implementación de perforadoras autónomas**

Si bien las perforadoras autónomas representan un avance significativo en la minería, existen límites tecnológicos que influyeron en su implementación y operación. Algunas de las limitaciones tecnológicas incluyen:

- **Infraestructura de comunicaciones específica:** Para garantizar la conectividad necesaria para el sistema de automatización de Flanders, fue indispensable instalar la red Radwin y una torre de comunicación dedicada. Esta red cuenta con un ancho de banda de 6 Mbps, baja latencia y roaming eficiente, su implementación requirió una inversión en infraestructura y ajustes operativos para cumplir con los requisitos técnicos del proveedor.

### **3.10.4 Impacto de la adaptación organizacional y humana**

La transición hacia perforadoras autónomas no solo implicó un cambio tecnológico, sino también una transformación significativa en los procesos y dinámicas laborales. Entre los principales desafíos relacionados con la adaptación organizacional y humana se encuentran:

- **Resistencia al cambio:** Algunos operadores enfrentaron dificultades para adaptarse a los sistemas autónomos debido a la preocupación por la automatización y su impacto en el empleo.

- **Curva de aprendizaje:** La familiarización con las herramientas de control remoto y las nuevas interfaces requirió un tiempo de adaptación, afectando temporalmente la productividad, especialmente en las etapas iniciales de implementación.
- **Ajustes operativos:** La introducción de tecnologías autónomas conllevó cambios en los procesos operativos, generando una breve interrupción en la dinámica de trabajo habitual, lo que pudo haber afectado el rendimiento inicial de los equipos.

**Tabla 9**

**Matriz de consistencia**

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS		VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
		INDEPENDIENTES	DEPENDIENTES			
		X	Y			
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>				
	Mejorar la eficiencia operativa en las perforaciones mineras mediante la implementación de perforadoras autónomas, incrementando la productividad en los procesos de perforación.	La transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas mejorará la eficiencia operativa en las perforaciones mineras, incrementando la productividad.				
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Xn</b>	<b>Yn</b>			
El uso de perforadoras manuales genera costos operativos elevados por metro perforado debido a la baja eficiencia en el uso de recursos y el desgaste prematuro de los componentes.	Reducir los costos operativos por metro perforado mediante la transición de perforadoras manuales a perforadoras autónomas, asegurando un uso eficiente de los recursos.	Transición	Costos	Metros perforados por hora (m/h)	Estudio de costos	Monitoreo de productividad.
La operación manual de las perforadoras incrementa los riesgos de seguridad para el personal, debido a la exposición directa a condiciones peligrosas y la dependencia de la intervención humana en actividades críticas.	Mitigar los riesgos de seguridad del personal asociados a la operación manual de las perforadoras, mediante el uso de perforadoras autónomas.	Transición	Seguridad	Número de incidentes reportados	Revisión de accidentes, monitoreo de riesgos.	

*Nota:* Elaboración propia.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la implementación de perforadoras autónomas en comparación con las manuales. Se evaluarán tendencias, diferencias y beneficios identificados durante los periodos estudiados, respaldados por gráficas y análisis.

### 4.1 Exploración estadística inicial de los datos de profundidad perforada

En esta sección, se realiza un análisis exploratorio inicial para identificar patrones y características generales de los datos de profundidad perforada. A través de representaciones gráficas como histogramas, diagramas de puntos y boxplots, se evalúan las distribuciones, posibles valores atípicos y la dispersión de los datos. (Anexos 1 – 15)

**Tabla 10**

#### *Estadísticas descriptivas de profundidad perforada*

Equipo	N (Manual)	Media (Manual)	Desv. Est. (Manual)	N (Autónomo)	Media (Autónomo)	Desv. Est. (Autónomo)
D4101	45,496	16.84	1.56	14,543	16.63	1.54
D4102	41,646	16.80	1.17	25,682	16.52	1.59
D4103	37,157	17.17	1.10	16,779	16.62	1.08
D4104	10,114	17.32	2.65	8,654	17.04	1.99
D4132	30,792	16.57	2.49	29,236	16.43	2.30

*Nota:* Elaboración propia

En la Tabla 10, se observa que los datos preliminares presentan variabilidad considerable en ambos modos. Sin embargo, la autonomía muestra una distribución más compacta, lo que refleja un mejor control operativo incluso antes de la depuración de datos.

### 4.2 Análisis estadístico depurado de los datos de profundidad perforada

Tras realizar una limpieza de los datos mediante la exclusión de valores fuera de los bigotes del rango intercuartil, se presenta un análisis más preciso. Esta depuración elimina los valores extremos, que podrían distorsionar los resultados, y garantiza una evaluación confiable de las tendencias y distribuciones reales.

**Tabla 11***Estadísticas descriptivas de profundidad perforada depurada*

Equipo	N (Manual)	Media (Manual)	Desv. Est. (Manual)	N (Autónomo)	Media (Autónomo)	Desv. Est. (Autónomo)
D4101	44,769	16.96	0.95	13,484	17.00	0.76
D4102	40,881	16.89	0.86	24,523	16.99	0.82
D4103	36,112	17.27	0.78	15,575	17.02	0.75
D4104	9,840	17.68	0.91	7,696	17.40	0.69
D4132	29,001	16.81	0.80	27,484	16.88	0.78

Nota: Elaboración propia

Tras eliminar valores atípicos (Tabla 11), la autonomía sigue mostrando resultados superiores:

- La media y mediana de profundidad perforada incrementan, indicando una estabilidad en las operaciones autónomas.
- La desviación estándar se reduce significativamente, reflejando un menor rango de variabilidad en las perforadoras autónomas.

**4.3 Análisis estadístico de la velocidad de perforación**

El análisis de la velocidad de perforación permite evaluar el desempeño de los equipos e identificar variaciones.

A continuación, se presentan gráficos y resultados que ilustran el comportamiento de la velocidad de perforación para cada perforadora, diferenciando el periodo manual y el periodo autónomo, con el objetivo de comparar ambos modos de operación.

**Tabla 12***Estadísticas descriptivas de la velocidad de perforación*

Equipo	D4101	D4102	D4103	D4104	D4132
<b>N (Manual)</b>	44,769	40,881	36,112	9,840	29,001
<b>Media Vel. (Manual)</b>	72.69	72.41	79.49	85.67	67.26
<b>Desv. Est. Vel. (Manual)</b>	4.06	3.53	3.58	4.39	3.92
<b>Mín Vel. (Manual)</b>	60.26	61.71	71.54	73.16	59
<b>Máx Vel. (Manual)</b>	83.57	81.86	90	97.87	73.2
<b>N (Autónomo)</b>	13,484	24,523	15,575	7,696	27,484

<b>Media Vel. (Autónomo)</b>	77.37	78.59	79.29	88.93	73.71
<b>Desv. Est. Vel. (Autónomo)</b>	3.45	3.02	3.57	3.52	3.8
<b>Mín Vel. (Autónomo)</b>	68.38	67.22	69.6	79.88	62.38
<b>Máx Vel. (Autónomo)</b>	85.95	89.26	88.32	97.6	83.9

Nota: Elaboración propia

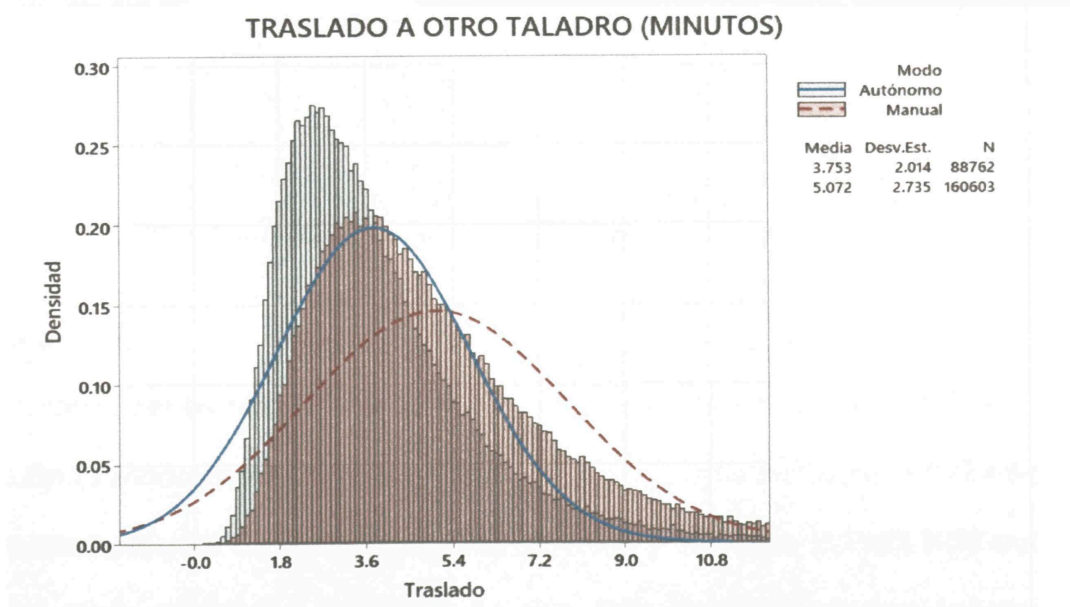
La Tabla 12 evidencia una clara ventaja de velocidad del modo autónomo respecto al modo manual.

- **Incremento en la media:** La velocidad promedio en autonomía supera a la manual en todas las perforadoras, con un aumento significativo en la D4104 (88.93 m/h frente a 85.67 m/h).
- **Menor variabilidad:** La desviación estándar es consistentemente menor en autonomía, lo que indica un desempeño más predecible y eficiente.

#### 4.4 Análisis de desempeño operativo

Figura 14

Tiempo de traslado a otro taladro (minutos)



Nota: Elaboración propia

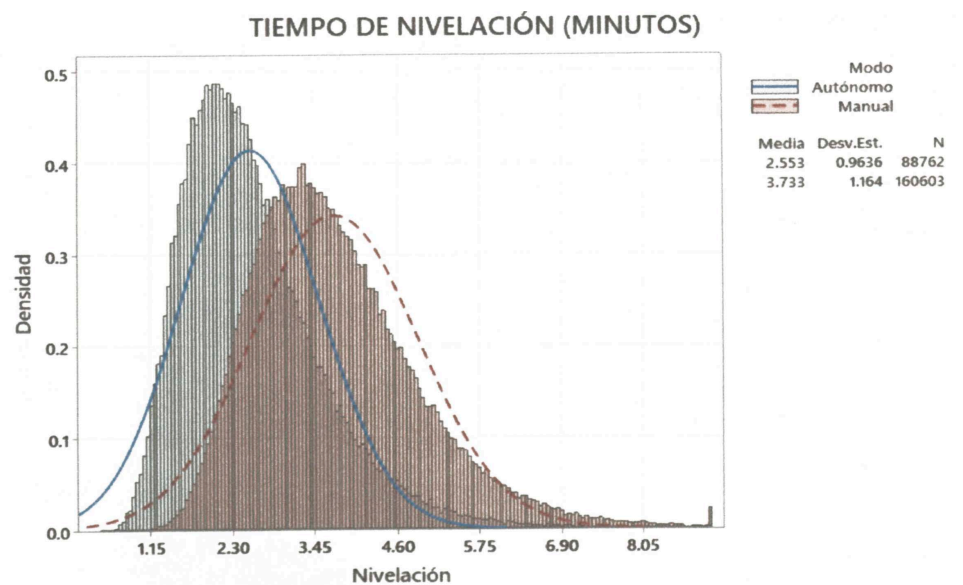
Los resultados muestran que el modo autónomo alcanza un tiempo promedio de traslado entre taladros de **3,75 minutos**, significativamente menor al registrado en el modo manual (**5,07 minutos**). Esta reducción de **1,32 minutos por evento** representa una

mejora operativa importante, ya que disminuye los periodos improductivos asociados al cambio de ubicación del equipo.

Asimismo, la **menor desviación estándar** en el modo autónomo (2,01 min frente a 2,73 min en manual) indica **mayor estabilidad y predictibilidad** en los traslados, lo que favorece la planificación de las tareas y la continuidad operativa. La amplitud de las bases de datos analizadas (88.762 registros para autónomo y 160.603 para manual) respalda la solidez estadística de la comparación, evidenciando que la operación autónoma no solo es más rápida sino también más consistente en este aspecto.

### Figura 15

*Tiempo de nivelación (minutos)*



Nota: Elaboración propia

El análisis del tiempo de nivelación muestra diferencias claras entre los modos de operación. En el modo **manual**, el tiempo promedio registrado fue de **3,733 minutos** con una desviación estándar de **1,164 minutos** sobre una muestra de **160 603 eventos**. En contraste, el modo **autónomo** presentó un promedio significativamente menor de **2,553 minutos**, con una desviación estándar de **0,9636 minutos** y una muestra de **88 762 eventos**.

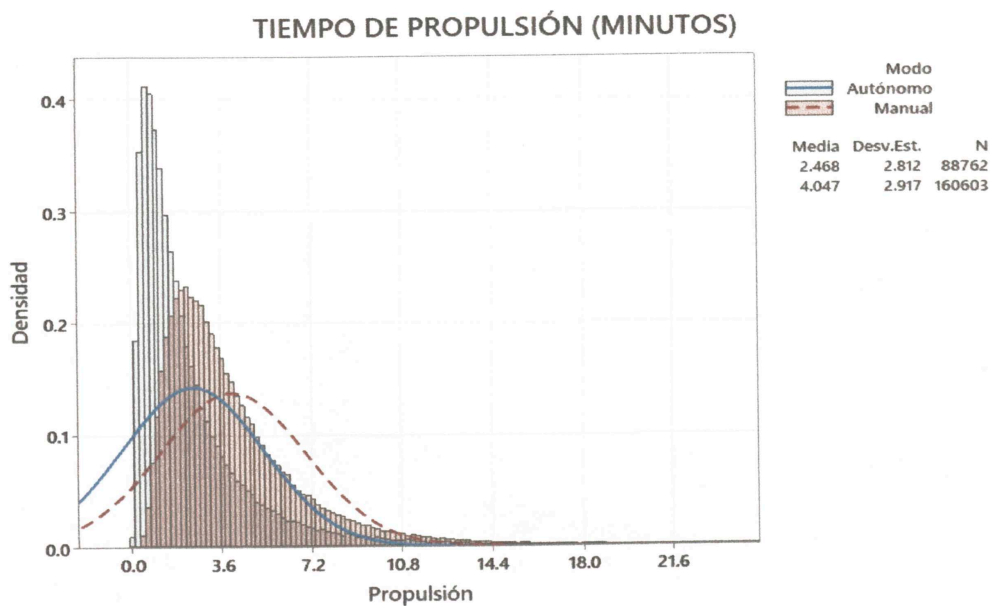
En el histograma agrupado se observa que la distribución de los tiempos para la operación autónoma se concentra más hacia valores bajos, mostrando un sesgo hacia la

izquierda con menor dispersión, lo que refleja mayor consistencia operativa. Por el contrario, la operación manual presenta una mayor dispersión y un desplazamiento hacia tiempos más altos, indicando mayor variabilidad en la ejecución.

Esta reducción de aproximadamente **1,18 minutos** por ciclo en la operación autónoma representa una ganancia operativa significativa, especialmente considerando el alto número de eventos, lo que se traduce en un ahorro acumulado importante de tiempo y, por ende, en una mayor eficiencia del proceso de perforación. Además, la menor variabilidad en el modo autónomo sugiere una estandarización más robusta del procedimiento de nivelación, reduciendo el impacto de factores humanos y externos.

**Figura 16**

*Tiempo de propulsión (minutos)*



*Nota:* Elaboración propia

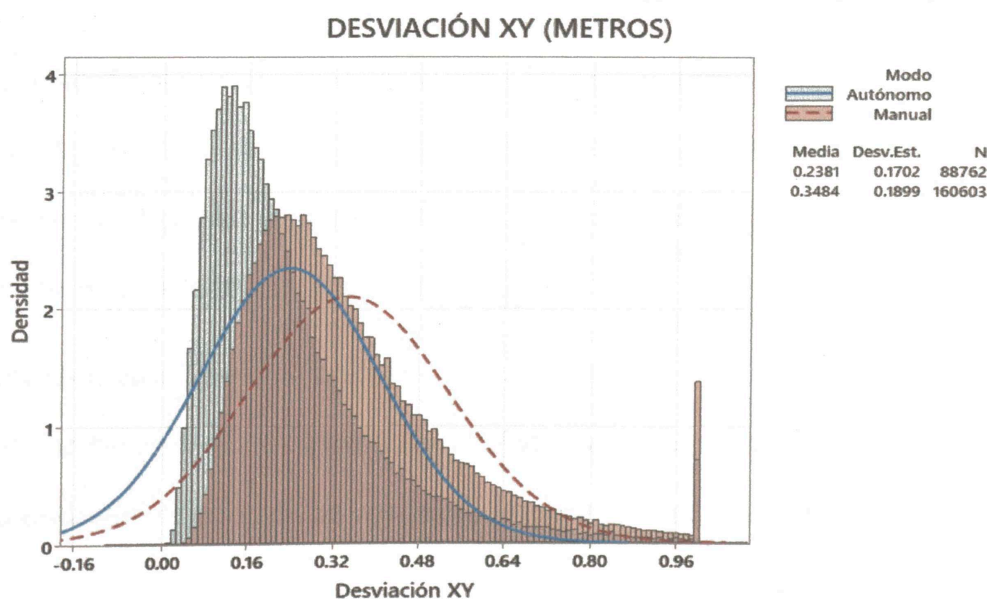
Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas entre los modos de operación autónomo y manual en cuanto al tiempo de propulsión del equipo. En el modo **autónomo**, se registró un **tiempo promedio de 2,468 minutos**, mientras que, en el modo **manual**, el promedio fue considerablemente mayor, alcanzando los **4,047 minutos**. Esta diferencia de aproximadamente **1,58 minutos por evento** representa una mejora sustancial en eficiencia cuando se emplea el sistema autónomo, ya que permite reducir los periodos improductivos asociados al movimiento del equipo entre ciclos operativos.

Desde el punto de vista de la **variabilidad**, el modo autónomo también muestra una ventaja relevante. La **desviación estándar** fue de **2,812 minutos** en modo autónomo y de **2,917 minutos** en modo manual. Aunque la diferencia en la dispersión no es tan amplia, sigue indicando una **ligera mayor consistencia** en los tiempos cuando se utiliza el sistema autónomo.

La **robustez de los datos analizados** —88.762 eventos para el modo autónomo y 160.603 para el modo manual— otorga **solidez estadística** a esta comparación, permitiendo concluir que la operación autónoma no solo es más eficiente en términos de tiempo, sino también más predecible.

**Figura 17**

*Desviación XY (metros)*



*Nota:* Elaboración propia

Los resultados muestran una clara ventaja del sistema autónomo en términos de precisión de posicionamiento. En el modo **autónomo**, la **desviación media en el plano XY** fue de **0,2381 metros**, mientras que en el modo **manual** se registró una media significativamente mayor de **0,3484 metros**. Esta diferencia de aproximadamente **0,11 metros por evento** refleja una **mejor capacidad de alineación y exactitud** del sistema autónomo durante la ejecución de las maniobras.

Desde el punto de vista de la **variabilidad**, el modo autónomo también presenta un desempeño superior. La **desviación estándar** fue de **0,1702 metros** para el modo autónomo, comparada con **0,1899 metros** en el modo manual. Aunque las desviaciones son relativamente cercanas, la menor dispersión en el modo autónomo sugiere **mayor consistencia en el posicionamiento**, lo cual es clave para garantizar calidad y repetibilidad en procesos como perforación o carguío.

Al igual que en los análisis anteriores, la **cantidad de eventos analizados** — 88.762 para el modo autónomo y 160.603 para el modo manual— aporta **solidez estadística**, permitiendo afirmar que estas diferencias no son producto del azar, sino del comportamiento sistemático de cada modo operativo.

#### 4.5 Análisis de indicadores operativos

El análisis de la disponibilidad, uso de disponibilidad y utilización operativa de los equipos es clave para evaluar su desempeño y eficiencia. A través de gráficos y resultados, se presentan las variaciones en el desempeño de los equipos, permitiendo una evaluación clara de la eficiencia en cada modo de operación.

##### 4.5.1 Disponibilidad Operativa (%D)

La disponibilidad es un indicador crítico que refleja el tiempo durante el cual las perforadoras estuvieron operativas respecto al tiempo total disponible.

**Tabla 13**

##### *Estadísticas descriptivas de disponibilidad*

Equipo	D4101	D4102	D4103	D4104	D4132
<b>N (Manual)</b>	1,326	1,072	1,044	325	896
<b>Media Disp. (Manual)</b>	45.04	49.95	45.78	44.04	53.47
<b>Desv. Est. (Manual)</b>	21.6	18.34	17.83	20.99	19.01
<b>Máx Disp. (Manual)</b>	100	100	100	91.31	100
<b>N (Autónomo)</b>	467	774	550	223	909
<b>Media Disp. (Autónomo)</b>	54.11	57.35	57.16	58.37	63.45
<b>Desv. Est. (Autónomo)</b>	26.59	23.93	24.31	24.14	22.25
<b>Máx Disp. (Autónomo)</b>	97.95	98.95	99.11	100	100

*Nota:* Elaboración propia

La Tabla 13 presenta las estadísticas descriptivas para disponibilidad en los modos manual y autónomo, respectivamente.

- En promedio, la disponibilidad fue superior en el modo autónomo para todos los equipos, destacando la perforadora **D4132** con un incremento significativo de **53.47% (manual) a 63.45% (autónomo)**.
- Esto representa un aumento promedio del **17.9%** en el modo autónomo comparado con el manual.

La desviación estándar en el modo autónomo es consistentemente mayor que en el manual, indicando una mayor variabilidad en los tiempos de disponibilidad. Esto puede ser atribuido a la dependencia tecnológica y los **ajustes iniciales** del sistema autónomo.

#### 4.5.2 Uso de la disponibilidad (%UD)

La utilización mide el porcentaje de tiempo en que los equipos estuvieron efectivamente operativos. La Tabla 14 muestra las estadísticas descriptivas de utilización para ambos modos.

**Tabla 14**

##### *Estadísticas descriptivas del uso de la disponibilidad*

Equipo	D4101	D4102	D4103	D4104	D4132
<b>N (Manual)</b>	1,356	1,090	1,054	332	924
<b>Media Uso Disp. (Manual)</b>	86.39	87.89	90.32	92.49	84.49
<b>Desv. Est. (Manual)</b>	22.69	21.41	17.9	17.77	23.78
<b>Máx (Manual)</b>	100	100	100	100	100
<b>N (Autónomo)</b>	469	776	552	223	939
<b>Media Uso Disp. (Autónomo)</b>	89.67	90.1	86.56	89.05	80.77
<b>Desv. Est. (Autónomo)</b>	15.94	15.66	18.92	17.62	24.53
<b>Máx (Autónomo)</b>	100	100	100	100	100

*Nota:* Elaboración propia

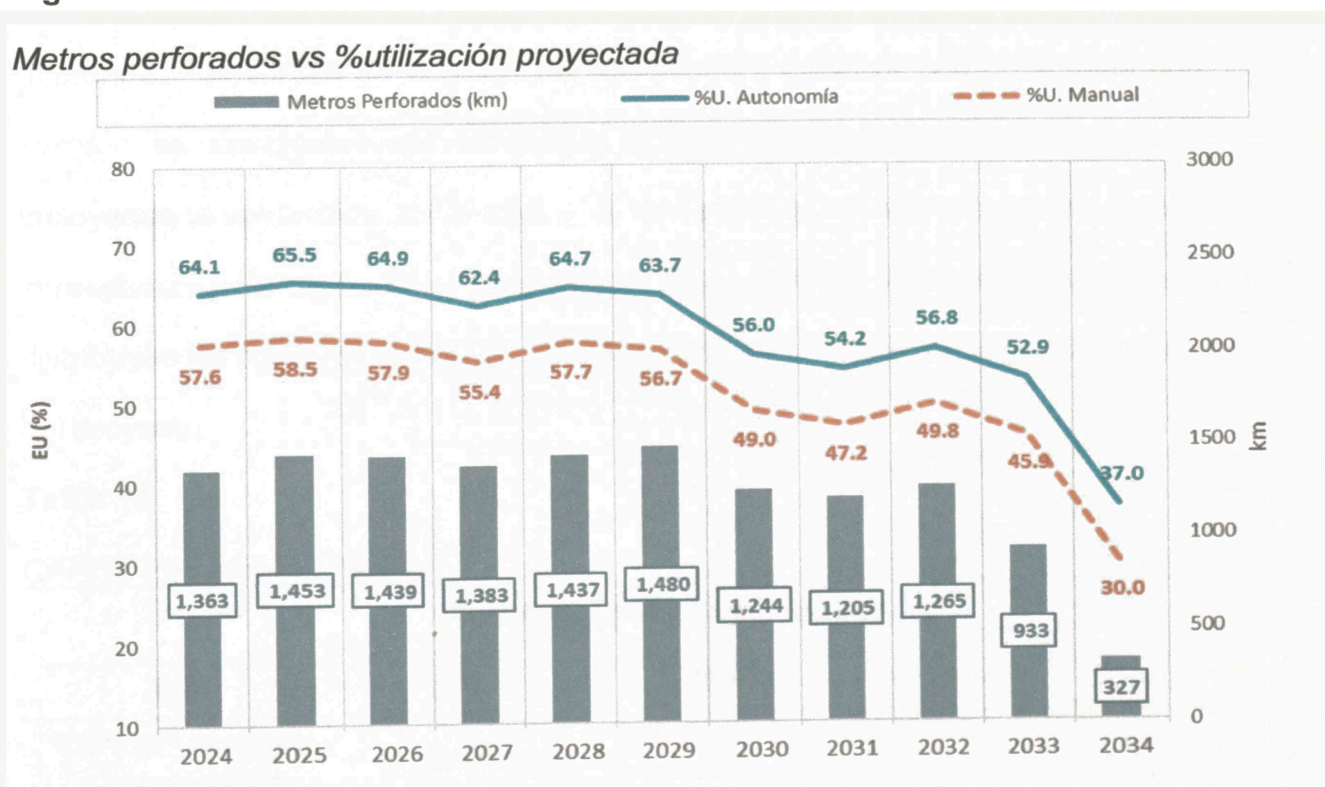
- El uso de la disponibilidad en el modo autónomo supera al modo manual en promedio para la mayoría de los equipos.
- Sin embargo, el equipo **D4132** muestra una ligera disminución en el promedio de uso de la disponibilidad, pasando de **84.49% (manual) a**

80.77% (autónomo). Este comportamiento se debe a falta de área de perforación.

#### 4.5.3 Proyección de la utilización (%U)

El gráfico muestra la evolución anual de los metros perforados (km) y el porcentaje de utilización (U%) bajo dos escenarios: autonomía y manual, durante el período 2024–2034.

Figura 18



Nota: Elaboración propia

El gráfico muestra que el modo autónomo mantiene siempre un % de utilización (U) superior al manual, partiendo en 64,1% frente a 57,6% en 2024 y alcanzando su máximo de 64,9% en 2026. Desde 2030 ambos modos presentan una caída sostenida, llegando en 2034 a 37,0% (autónomo) y 30,0% (manual).

La producción anual en metros perforados se mantiene estable hasta 2029 (1.363–1.480 km) y luego disminuye de forma progresiva hasta 327 km en 2034. Esto indica que, aunque la autonomía ofrece mayor eficiencia operativa, la baja general de actividad al final del periodo operativo de la mina afecta por igual a ambos modos.

## 4.6 Análisis de costos

En esta sección se comparan los costos asociados a la perforación manual y la perforación autónoma, considerando tanto el **CAPEX** como el **OPEX**. El objetivo es identificar el impacto económico de la implementación de la tecnología autónoma frente al método manual, así como el potencial de optimización en cada caso.

### 4.6.1 Inversión de Capital (CAPEX)

El análisis comparativo del CAPEX entre el escenario manual y el autónomo revela diferencias relevantes en la magnitud, estructura y temporalidad de la inversión. En esta sección se desglosan los principales componentes que conforman esta inversión, incluyendo la compra de perforadoras, la incorporación de tecnologías de automatización, infraestructura de soporte y capacitación. Este análisis permite comprender cómo se distribuyen los desembolsos a lo largo del tiempo y su impacto en la planificación financiera del proyecto.

**Tabla 15**

#### *CAPEX Perforación Manual*

RESUMEN CAPEX - CASO MANUAL				
Item	Año 1	Año 2	Año 3	Total
<b>CAPEX Perforadora Adicional (USD)</b>	\$ 7,560,000	\$ -	\$ -	\$ 7,560,000

*Nota: Adaptado de Compañía Minera Antapaccay*

En el caso manual, el desembolso se concentra exclusivamente en el **Año 1**, con la adquisición de una perforadora adicional por un monto de **USD 7,56 millones**. Esta inversión única responde a la necesidad de cumplir con los planes de producción manteniendo una operación tradicional, dependiente de personal y equipos convencionales. La ausencia de inversiones posteriores indica un esquema de **capital inicial estático**, sin incorporación progresiva de mejoras tecnológicas ni adaptación a nuevas condiciones operativas.

En el **caso manual**, la inversión se concentra en el **Año 1** con la compra de una perforadora adicional, alcanzando un total de **USD 7,56 millones**. Este gasto único responde a la necesidad de ampliar la flota para cumplir las metas de producción, asumiendo que la operación dependerá completamente de personal y equipos convencionales. La ausencia de gastos significativos en los años posteriores indica una estrategia de inversión inicial simple, pero sin mejoras tecnológicas progresivas.

**Tabla 16**

*CAPEX Perforación Autónoma*

<b>RESUMEN CAPEX – CASO AUTONOMÍA</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Total</b>
<b>CAPEX Perforadora Adicional (USD)</b>	<b>3,778,000</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>3,778,000</b>
<b>CAPEX Autonomía (USD)</b>	<b>3,467,000</b>	<b>6,800,000</b>	<b>1,283,000</b>	<b>11,550,000</b>
<b>Delta CAPEX (USD)</b>	<b>311,000</b>	<b>-6,800,000</b>	<b>-1,283,000</b>	<b>-7,772,000</b>
<b>CAPEX Autonomía (MUSD)</b>	<b>7.25</b>	<b>6.80</b>	<b>1.28</b>	<b>15.33</b>
<b>CAPEX Manual (MUSD)</b>	<b>7.56</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>7.56</b>

*Nota:* Adaptado de Compañía Minera Antapaccay

Por el contrario, el escenario autónomo presenta un **CAPEX escalonado** durante los tres primeros años, con un total acumulado de **USD 15,33 millones**. Este monto —un **67,9 % superior** al del caso manual— se explica por la implementación de sistemas de autonomía, incluyendo **sensores, módulos de comunicación, software especializado, adecuaciones de infraestructura, kits de autonomía y programas de capacitación técnica**.

En contraste, el **caso autónomo** presenta una estructura de CAPEX **más diversificada y escalonada** a lo largo de los tres primeros años, con un total acumulado de **USD 15,33 millones**. Este mayor monto responde a la incorporación de tecnología de autonomía, la adecuación de infraestructura, la instalación de redes dedicadas, la adquisición de kits de autonomía y programas de capacitación especializada. Los mayores desembolsos se concentran en los **años 1 y 2**, destacando la implementación inicial de los sistemas autónomos (USD 3,47 millones en verificación y USD 2,27 millones en kits de autonomía en el primer año) y la segunda fase de despliegue en el segundo año (USD 6,80 millones, incluyendo ampliación de infraestructura y soporte técnico).

El desglose evidencia que, aunque el CAPEX autónomo casi **duplica** al del escenario manual, gran parte de la inversión corresponde a activos y capacidades que **no solo sustituyen la necesidad de equipos adicionales**, sino que también **generan ahorros operativos sostenidos** en OPEX a lo largo del horizonte del proyecto. En particular, la menor dependencia de una perforadora adicional en el modelo autónomo (USD 3,78 millones frente a USD 7,56 millones en el manual) contribuye a amortiguar parcialmente el mayor gasto inicial en tecnología.

#### **4.6.2 Costos Operativos (OPEX)**

El análisis del OPEX muestra cómo la automatización impacta en la reducción de costos operativos recurrentes, especialmente en mano de obra, consumo de combustible y mantenimiento, evidenciando un ahorro sostenido durante el horizonte del proyecto. Se

**evaluarán los diferentes rubros que componen el OPEX para cada escenario, con el fin de identificar las fuentes principales de ahorro y optimización operativa**

**Tabla 17**

**OPEX Perforación Manual**

<b>RESUMEN OPEX – CASO MANUAL</b>												
OPEX	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total
<b>Mano de obra + Costos indirectos (USD)</b>	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	1,052,600	601,000	451,000	10,525,400
<b>Combustible (USD)</b>	929,000	846,000	797,000	797,000	728,000	730,000	728,000	764,000	764,000	0	0	7,083,000
<b>Energía (USD)</b>	843,000	1,110,000	1,271,000	1,158,000	1,070,000	1,054,000	1,053,000	785,000	701,000	425,000	171,000	9,641,000
<b>Compra perforadora adicional (USD)</b>	1,883,000	2,609,000	2,566,000	2,549,000	2,567,000	2,479,000	2,483,000	2,245,000	1,694,000	0	0	21,075,000
<b>OPEX Total (USD)</b>	<b>4,707,600</b>	<b>5,617,600</b>	<b>5,686,600</b>	<b>5,556,600</b>	<b>5,417,600</b>	<b>5,315,600</b>	<b>5,316,600</b>	<b>4,846,600</b>	<b>4,211,600</b>	<b>1,026,000</b>	<b>622,000</b>	<b>48,324,400</b>

Nota: Adaptado de Compañía Minera Antapaccay

**Tabla 18**

**OPEX Perforación Autónoma**

<b>RESUMEN OPEX – CASO AUTÓNOMO</b>												
OPEX	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total
<b>Mano de obra + Costos indirectos (USD)</b>	902,000	601,000	601,000	601,000	601,000	601,000	601,000	601,000	601,000	263,000	113,000	6,086,000
<b>Combustible (USD)</b>	793,000	723,000	680,000	681,000	622,000	622,000	622,000	653,000	652,000	0	0	6,048,000
<b>Energía (USD)</b>	790,000	993,000	1,137,000	1,036,000	957,000	941,000	940,000	697,000	613,000	386,000	153,000	8,643,000
<b>Compra perforadora adicional (USD)</b>	1,044,000	1,488,000	1,448,000	1,430,000	1,449,000	1,357,000	1,364,000	1,126,000	577,000	0	0	11,283,000
<b>OPEX Total (USD)</b>	<b>3,529,000</b>	<b>3,805,000</b>	<b>3,866,000</b>	<b>3,748,000</b>	<b>3,629,000</b>	<b>3,521,000</b>	<b>3,527,000</b>	<b>3,077,000</b>	<b>2,443,000</b>	<b>649,000</b>	<b>266,000</b>	<b>32,060,000</b>

Nota: Adaptado de Compañía Minera Antapaccay

En términos de **productividad laboral**, el escenario autónomo permite que **un solo operador supervise hasta 2,5 equipos por turno**, generando una reducción progresiva y significativa de la dotación de personal. Esta optimización comienza a evidenciarse a partir del segundo año del proyecto, cuando el nivel de autonomía y la experiencia operativa permiten distribuir la supervisión de manera más eficiente.

Como resultado, se logra una **reducción acumulada de USD 4,439,400** en costos de personal respecto al caso manual, diferencia que se acentúa a partir de 2025, momento en el cual un operador atiende múltiples equipos por turno y el costo anual se mantiene prácticamente constante hasta el final del horizonte evaluado. La planificación de recursos humanos se sustenta en vectores de dotación proyectados que permiten un ajuste dinámico del número de operadores según la cantidad de equipos requeridos en cada periodo.

En relación con el **consumo energético**, el costo unitario de la energía eléctrica (USD/kWh) varía según las proyecciones financieras del sitio; sin embargo, la perforación autónoma introduce un **ahorro promedio del 5 % en la tasa de consumo**. Esto se debe a que las perforadoras autónomas operan bajo parámetros óptimos, evitando ciclos ineficientes y reduciendo pérdidas por tiempos improductivos.

Como resultado, el consumo total de energía en el escenario manual es superior, reflejando una menor eficiencia operativa. De hecho, el consumo energético acumulado en el caso autónomo **es 10.35 % menor** frente al manual, lo que representa un **ahorro aproximado de USD 998,000**.

Esta brecha se amplía en los últimos años del horizonte analizado, coincidiendo con la consolidación del aprendizaje del sistema autónomo y la optimización continua de los ciclos de perforación. Esto indica que los beneficios energéticos derivados de la autonomía no solo son inmediatos, sino que se incrementan conforme el sistema madura y se estabiliza.

Respecto al **consumo de combustible**, la autonomía permite maximizar el uso de la perforadora eléctrica D4104 (PIT VIPER 351), reduciendo así las horas operativas de la

perforadora diésel. Este cambio en la asignación de equipos contribuye a una reducción del 4 % en la tasa de consumo de diésel en comparación con la operación manual.

Además, la operación autónoma optimiza el rendimiento del motor al mantener cargas de trabajo estables y evitar aceleraciones ociosas, lo que repercute positivamente tanto en el consumo de combustible como en la vida útil de los equipos.

Como resultado, la combinación de un menor uso de perforadoras diésel y un mayor uso de perforadoras eléctricas genera una **disminución acumulada del 14,61 % en el consumo total de combustible**, equivalente a aproximadamente **USD 1,035,000** menos que en el caso manual.

#### **4.6.3 Evaluación Financiera**

En esta sección se presenta la evaluación financiera del proyecto que compara el desempeño económico de la operación manual y la autónoma considerando los flujos de caja proyectados, el costo unitario por metro perforado y el **valor actual de costos (VAC)**. A diferencia de un análisis tradicional de rentabilidad que contempla ingresos y utilidades, en este estudio el enfoque se centra exclusivamente en los **costos totales (CAPEX + OPEX)** de cada alternativa, de manera que la opción más conveniente será aquella que presente un **VAC menor**, es decir, un menor costo acumulado a lo largo del horizonte de evaluación.

**Tabla 19**

*Evaluación Financiera Perforación Caso Manual*

<b>CASO MANUAL</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>TOTAL</b>
<b>OPEX USD</b>	4,707,600	5,617,600	5,686,600	5,556,600	5,417,600	5,315,600	5,316,600	4,846,600	4,211,600	1,026,000	622,000	48,324,400
<b>CAPEX USD</b>	7,560,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,560,000
<b>Cash Flow USD</b>	12,267,600	5,617,600	5,686,600	5,556,600	5,417,600	5,315,600	5,316,600	4,846,600	4,211,600	1,026,000	622,000	55,884,400
<b>VAC USD</b>	37,615,000											

*Nota: Adaptado de Compañía Minera Antapaccay*

**Tabla 20**

*Evaluación Financiera Perforación Caso Autónomo*

<b>CASO AUTÓNOMO</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>	<b>TOTAL</b>
<b>OPEX USD</b>	3,529,000	3,805,000	3,866,000	3,748,000	3,629,000	3,521,000	3,527,000	3,077,000	2,443,000	649,000	266,000	32,060,000
<b>CAPEX USD</b>	7,245,000	6,800,000	1,283,000	0	0	0	0	0	0	0	0	15,328,000
<b>Cash Flow USD</b>	10,774,000	10,605,000	5,149,000	3,748,000	3,629,000	3,521,000	3,527,000	3,077,000	2,443,000	649,000	266,000	47,388,000
<b>VAC USD</b>	34,346,000											

*Nota: Adaptado de Compañía Minera Antapaccay*

En términos de **CAPEX**, se identifican diferencias relevantes asociadas principalmente a la adquisición de equipos, implementación de tecnología y adecuaciones operativas. La alternativa con perforación autónoma presenta un CAPEX superior al escenario manual, debido a la inversión en sistemas de control, sensores y software especializado. Sin embargo, este mayor desembolso inicial se ve compensado por reducciones significativas en OPEX a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

**Tabla 21**

*Resumen Financiero*

Resumen Financiero	Total
<b>VAC USD</b>	\$ 3,269,000
<b>Costo unitario – caso manual USD/mt</b>	\$ 5.26
<b>Costo unitario – caso autónomo USD/mt</b>	\$ 4.75

*Nota:* Adaptado de Compañía Minera Antapaccay

- A pesar de un **CAPEX 102 % mayor**, la perforación autónoma logra **reducir el OPEX en más de USD 16 millones** a lo largo del horizonte evaluado.
- El **VAC menor en 8,7 %** respalda que, en términos financieros, el sistema autónomo es más eficiente en el uso de recursos.
- En perforación autónoma, el **costo por metro perforado es aproximadamente un 10 % menor** que en la perforación manual, constituyendo un factor clave para la eficiencia operativa. Esta diferencia se debe principalmente a la reducción de costos operativos, menor consumo de combustible y disminución en los requerimientos de personal directo. Todo ello es consecuencia de una operación más estable, con menores tiempos muertos y menor desgaste de componentes, gracias a un proceso uniforme y programado.
- La mayor inversión inicial se recupera en el mediano plazo, gracias al ahorro operativo sostenido.

#### 4.7 Evaluación de la seguridad del personal

Durante la operación autónoma, se identificaron efectos relevantes en la dinámica de seguridad operativa. Uno de los principales impactos fue la **reducción de la exposición directa del personal** en áreas de riesgo, particularmente en zonas inestables o en cercanía de equipos móviles. Esto fue posible gracias a la eliminación de tareas presenciales durante la perforación, lo que representa un cambio estructural en la forma de ejecutar este proceso.

Los registros muestran que la **continuidad operativa en momentos tradicionalmente improductivos** (como cambios de guardia, refrigerios o durante ventanas de voladura) no implicó compromisos en materia de seguridad. Estas actividades se realizaron con base en procedimientos definidos y bajo control remoto, lo que evidencia una gestión de riesgos activa y funcional en el nuevo esquema.

No obstante, también se evidenciaron factores técnicos que deben ser considerados desde una perspectiva de seguridad. En particular, la **pérdida ocasional de conectividad por la cobertura de red Radwin** lo cual puede generar interrupciones que afectan la trazabilidad en tiempo real, lo cual representa una condición operacional que debe ser mitigada para evitar escalamiento de eventos. Del mismo modo, la **infraestructura eléctrica insuficiente** en ciertas áreas (como subestaciones y switch houses) ha mostrado ser un punto crítico que, si no es gestionado adecuadamente, podría traducirse en riesgos tanto operacionales como personales.

Este comportamiento mixto evidencia que la transición hacia la autonomía genera oportunidades claras para mejorar la seguridad, pero también requiere reforzar las **capacidades técnicas de soporte**, especialmente en lo relacionado con conectividad e infraestructura crítica.

## **4.8 Beneficios observados y desafíos pendientes**

### **4.8.1 Beneficios clave**

Los resultados analizados a lo largo del proceso operativo muestran que el sistema de perforación autónoma ha generado **mejoras cuantificables en eficiencia y control operativo**. La **mejora en indicadores de productividad y la reducción de tiempos en el proceso**, indican un comportamiento más uniforme, con menores variaciones y mayor estabilidad frente al modo manual.

Este comportamiento más predecible ha tenido un efecto positivo en la **planificación de las tareas de perforación**, permitiendo una mejor sincronización con las actividades posteriores (carguío, voladura, etc.). Asimismo, la **operación durante ventanas improductivas** ha permitido un uso más eficiente del tiempo disponible, sin necesidad de incrementar dotación ni alterar la estructura de turnos.

Otro elemento relevante ha sido la **disminución en la intervención directa del operador**, lo que no solo mejora la seguridad, sino que también promueve una estandarización del proceso que es difícil de lograr en sistemas totalmente dependientes del factor humano.

En cuanto a gestión de talento, el proyecto permitió la **formación interna de controladores y la reubicación funcional de operadores**, lo cual resultó en un aprovechamiento eficiente del recurso humano sin incremento de costos ni dependencia de terceros. Esta estrategia facilitó la apropiación del sistema por parte del equipo y fortaleció la cultura interna en torno a la autonomía.

### **4.8.2 Desafíos pendientes**

Pese a los beneficios observados, los datos y experiencias recogidas durante el proyecto permiten identificar **brechas estructurales y organizacionales** que limitan el aprovechamiento pleno del sistema autónomo.

En primer lugar, las **fallas intermitentes en la conectividad**, vinculadas a la inicial cobertura insuficiente de red Radwin, afectaron la continuidad de la operación como la

supervisión remota. Esta condición generó incertidumbre operacional y redujo el margen de respuesta ante eventos no programados.

Además, la **infraestructura eléctrica presentó deficiencias** que afectaron a las perforadoras eléctricas. Estas fallas comprometieron la disponibilidad de los equipos.

A nivel organizacional, la **planificación de mina no siempre ha estado alineada con los requerimientos del sistema autónomo**. La generación de áreas fuera del estándar técnico para operación autónoma ha forzado maniobras adicionales, tiempos muertos y ajustes en campo que afectaron la eficiencia del sistema en una etapa inicial.

También existió una **resistencia cultural al cambio**, especialmente entre algunos operadores que tenían dudas sobre la confiabilidad del sistema.

Estos desafíos, observados tanto en los resultados operativos como en la experiencia de implementación, sugieren que **la consolidación de la perforación autónoma no depende únicamente de la tecnología**, sino también de su integración sistémica dentro de la organización y de la infraestructura que la soporta.

#### **4.9 Contrastación de la hipótesis**

Para evaluar la validez de la hipótesis planteada en la investigación, se realizó un análisis estadístico comparando los resultados obtenidos en la **perforación autónoma** frente a la **perforación manual**.

La hipótesis se formuló de la siguiente manera:

- **Hipótesis nula ( $H_0$ ):** No existe diferencia significativa en los resultados operativos y económicos entre la perforación autónoma y la perforación manual.
- **Hipótesis alterna ( $H_1$ ):** La perforación autónoma presenta un desempeño significativamente superior al de la perforación manual en términos de productividad, costos y eficiencia.

**Prueba estadística empleada.** Se utilizó la prueba **t de Student para muestras independientes**, debido a que se comparan dos grupos distintos (modo manual vs. modo autónomo) y no se asume igualdad de varianzas entre ellos.

La fórmula general de la prueba t de Student (Welch) es:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (16)$$

Donde:

$\bar{X}_1, \bar{X}_2$  = medias muestrales de los grupos (manual y autónomo).

$s_1^2, s_2^2$  = varianzas de cada grupo.

$n_1, n_2$  = tamaños de muestra

**Los grados de libertad (gl)** se calculan con la aproximación de Welch-Satterthwaite:

$$gl \approx \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (17)$$

**Nivel de significancia.** Se consideró un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  (95% de confianza).

Se evalúan las variables clave:

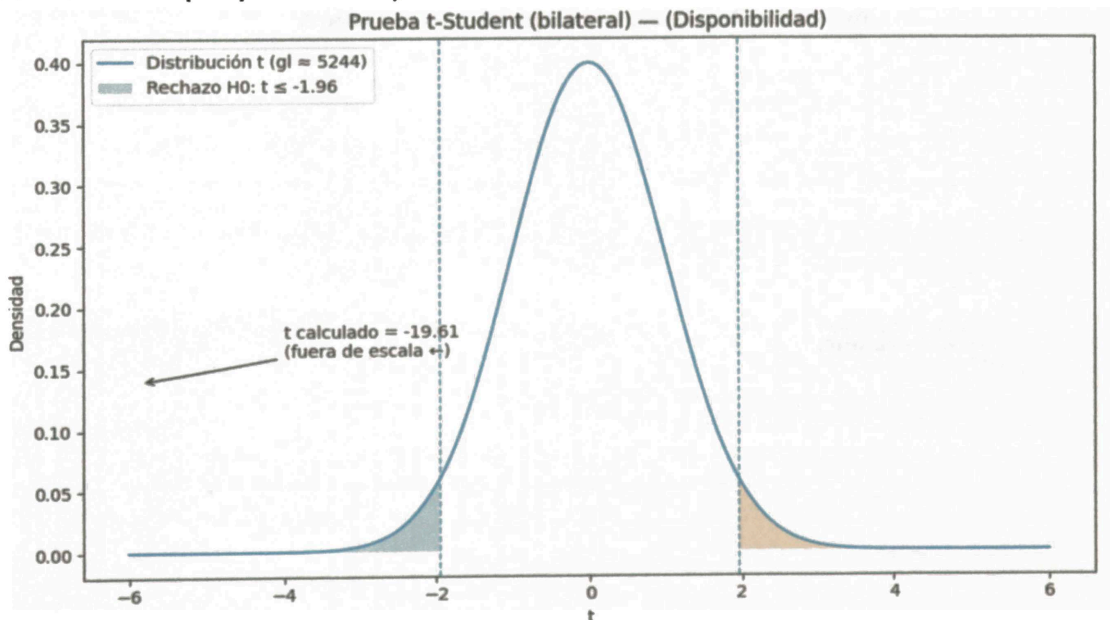
## Disponibilidad.

$$t = \frac{47.656 - 58.088}{\sqrt{\frac{382.359}{4663} + \frac{587.772}{2923}}} \quad (18)$$

$$t = -19.607$$

Figura 19

### Prueba *t* – Student (Disponibilidad)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = 19.607
- $p$ -valor < 0.0000001
- gl (ajustados por Welch) = 5,244

Interpretación: como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

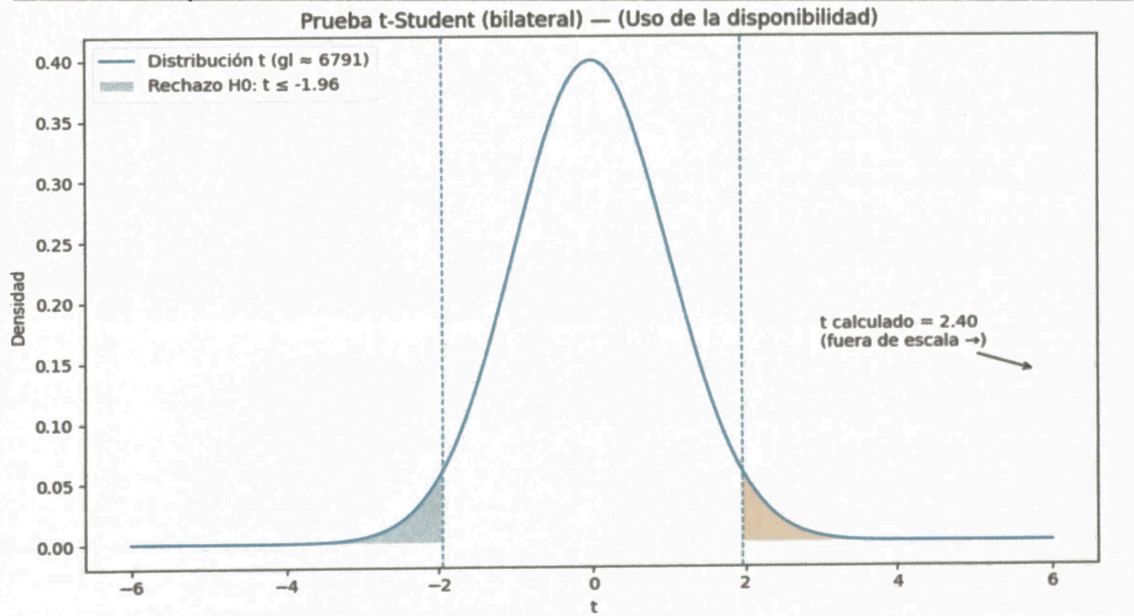
## Uso de disponibilidad.

$$t = \frac{88.316 - 87.230}{\sqrt{\frac{428.904}{4756} + \frac{343.509}{2959}}} \quad (19)$$

$$t = 2.400$$

Figura 20

### Prueba *t* – Student (Uso de disponibilidad)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = 2.400
- $p$ -valor = 0.016410
- gl (ajustados por Welch) = 6,791

Interpretación: como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

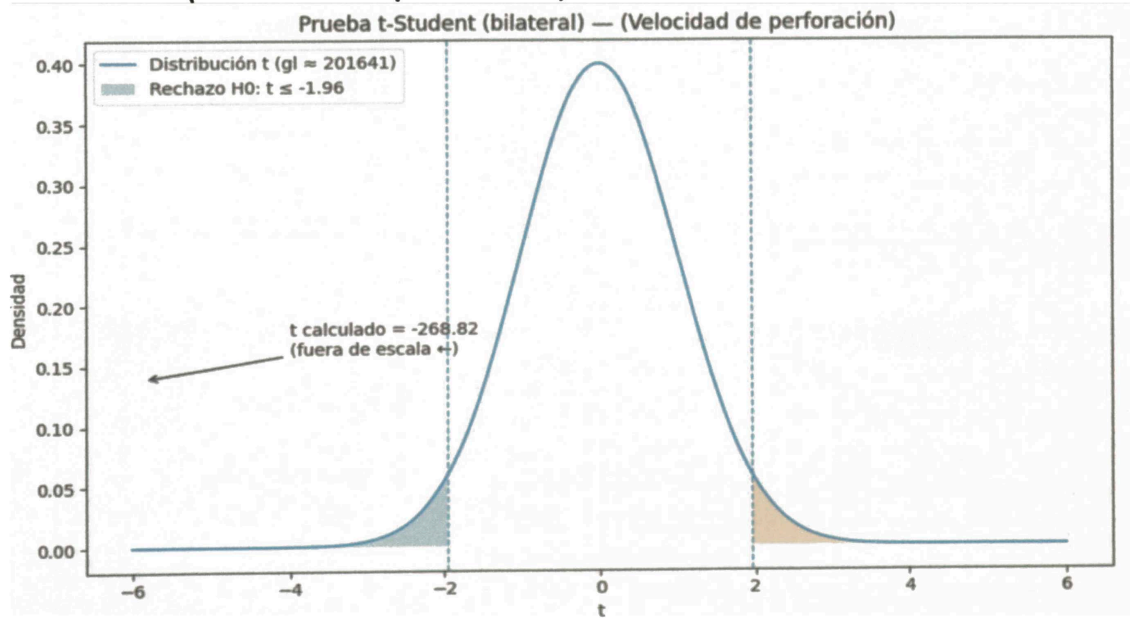
## Velocidad de perforación.

$$t = \frac{75.504 - 79.578}{\sqrt{\frac{15.179}{160603} + \frac{12.055}{88762}}} \quad (20)$$

$$t = -268.817$$

Figura 21

### Prueba $t$ – Student (Velocidad de perforación)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = - 268.817
- $p$ -valor < 0.0000001
- $gl$  (ajustados por Welch) = 201,641

Interpretación: como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

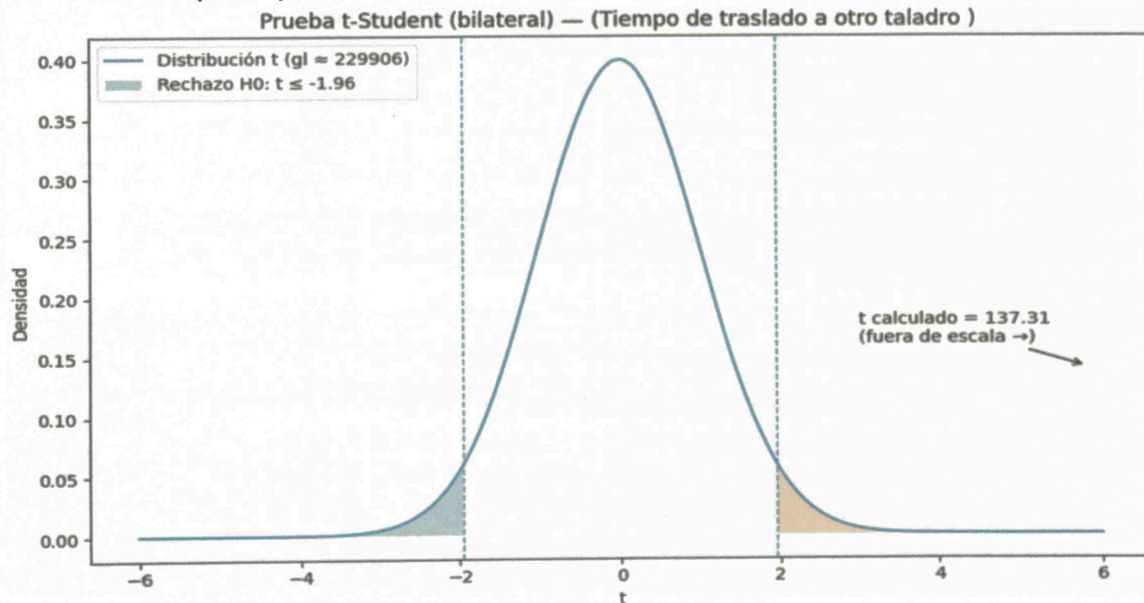
## Tiempo de traslado a otro taladro.

$$t = \frac{5.072 - 3.753}{\sqrt{\frac{7.480}{160603} + \frac{4.219}{88762}}} \quad (21)$$

$$t = 137.311$$

Figura 22

Prueba *t* – Student (Tiempo de traslado a otro taladro)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = 137.311
- $p$ -valor < 0.0000001
- gl (ajustados por Welch) = 229,906

Interpretación: como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

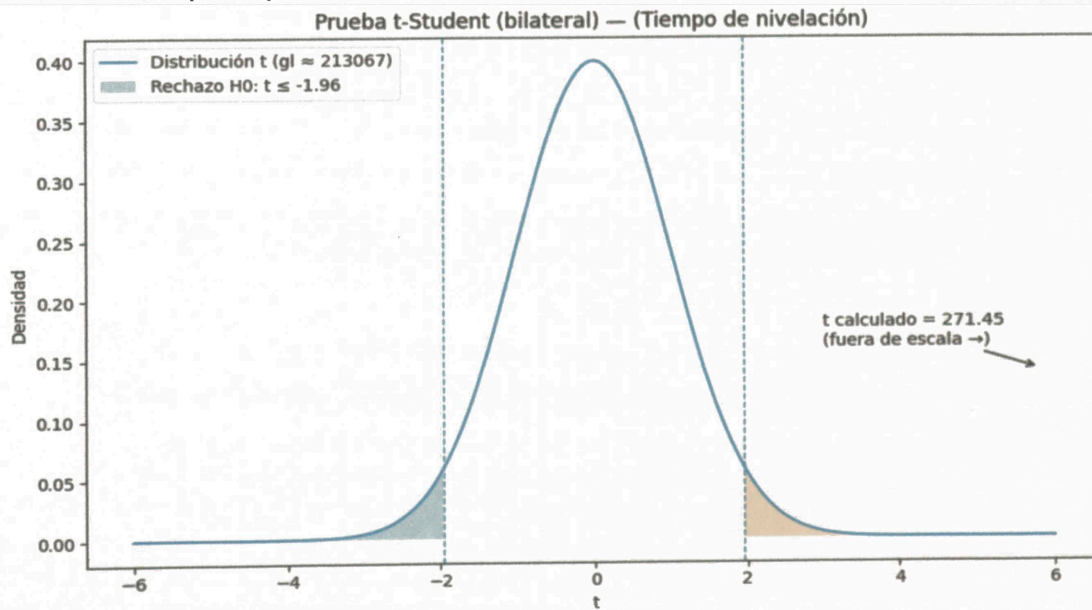
## Tiempo de nivelación.

$$t = \frac{3.733 - 2.553}{\sqrt{\frac{1.355}{160603} + \frac{0.929}{88762}}} \quad (22)$$

$$t = 271.446$$

## Figura 23

### Prueba *t* – Student (Tiempo de nivelación)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = 271.446
- $p$ -valor < 0.0000001
- gl (ajustados por Welch) = 213,067

**Interpretación:** como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

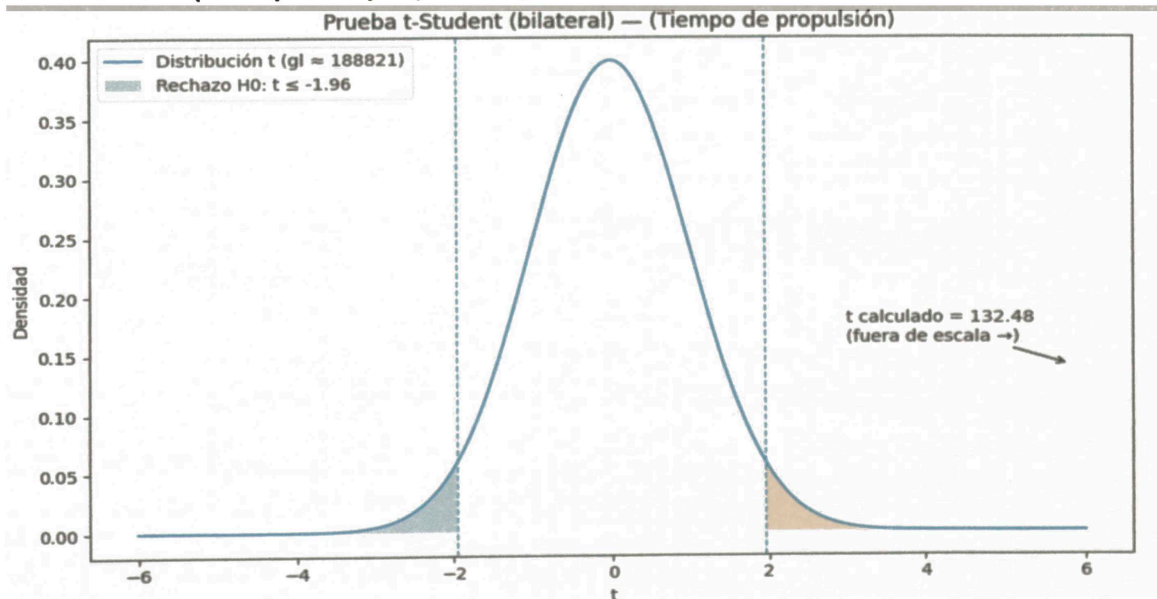
## Tiempo de propulsión.

$$t = \frac{4.047 - 2.468}{\sqrt{\frac{8.509}{160603} + \frac{7.907}{88762}}} \quad (23)$$

$$t = 132.476$$

## Figura 24

### Prueba $t$ – Student (Tiempo de propulsión)



Nota: Elaboración propia

- $\alpha$  (nivel de significancia) = 0.05
- $t$  crítico (bilateral, 95% IC) =  $\pm 1.960$
- $t$  estadístico (observado) = 132.476
- $p$ -valor < 0.0000001
- gl (ajustados por Welch) = 188,821

Interpretación: como  $p < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

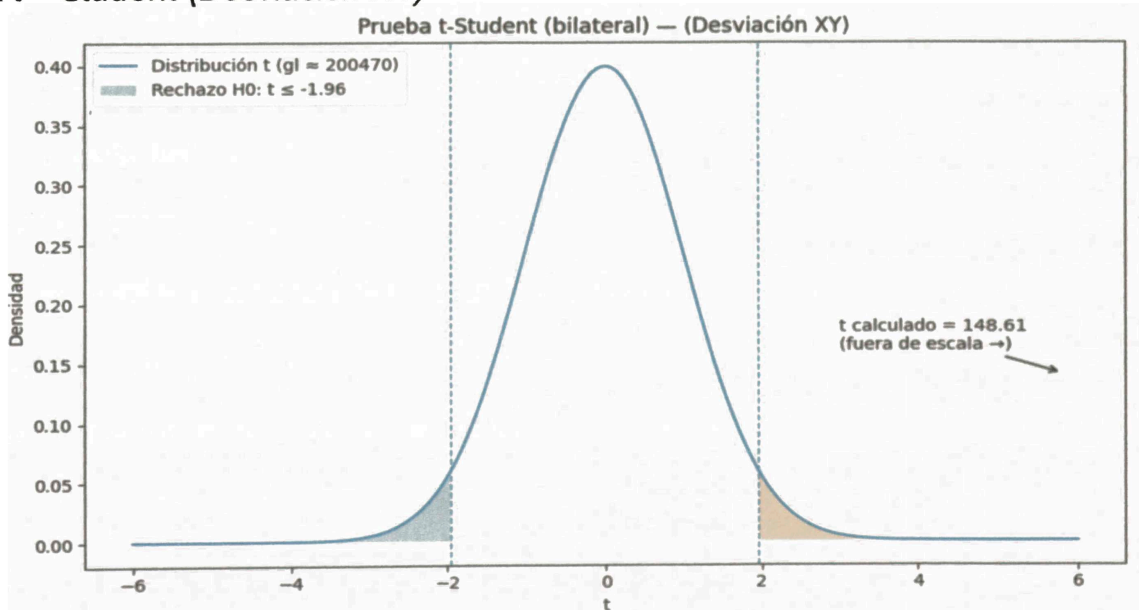
## Desviación XY.

$$t = \frac{0.3484 - 0.2381}{\sqrt{\frac{0.036}{160603} + \frac{0.029}{88762}}} \quad (24)$$

$$t = 148.607$$

## Figura 25

### Prueba t – Student (Desviación XY)



Nota: Elaboración propia

- **$\alpha$  (nivel de significancia)** = 0.05
- **$t$  crítico (bilateral, 95% IC)** =  $\pm 1.960$
- **$t$  estadístico (observado)** = 148.607
- **$\rho$ -valor** < 0.000001
- **gl (ajustados por Welch)** = 200,470

**Interpretación:** como  $\rho < \alpha$ , se rechaza  $H_0$  en favor de  $H_1$ .

**Resultados.** El valor calculado de **t** fue contrastado con el valor crítico de la distribución **t** de Welch para cada una de las variables analizadas. Los resultados obtenidos indican que:

- En **productividad y eficiencia**, la diferencia fue estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).
- En los indicadores de **costos operativos y tiempos de ejecución**, también se evidenció una diferencia significativa en favor del sistema de perforación autónoma ( $p < 0.05$ ).

**Decisión.** Dado que en todas las variables clave analizadas el valor de  $p$  fue menor a 0.05, se **rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ )** y se **acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ )**.

**Interpretación.** Esto confirma que la perforación autónoma es estadísticamente superior a la perforación manual, evidenciando mejoras en productividad, reducción de costos y mayor eficiencia en la operación.

## Conclusiones

El análisis integral de los modos de operación manual y autónomo en perforación muestra que la implementación de la autonomía tiene beneficios claros y mejoras cuantificables en seguridad, eficiencia operativa, costos y productividad.

En términos de seguridad, la autonomía elimina la exposición directa de operadores a riesgos asociados al polvo, ruido, caída de rocas, y colisión con equipos. Además, la integración de múltiples capas de seguridad, detección de personas y objetos, y sistemas OneTouch mejora notablemente la protección en zonas operativas peligrosas.

Si bien por políticas de confidencialidad no es posible divulgar el número exacto de incidentes reportados, el análisis interno evidencia una reducción del ratio de incidentes por cada 10 000 horas de operación en más del 80 % tras la adopción del modo autónomo. Este indicador refuerza el impacto positivo de la autonomía en la gestión de seguridad y control de riesgos.

Respecto a la eficiencia operativa, el modo autónomo presenta mejoras sustanciales y datos con menor variabilidad:

La velocidad de perforación aumenta en promedio, con incrementos destacados como en la perforadora D4104 que pasó de 85.67 m/h (manual) a 88.93 m/h (autónomo).

El tiempo de traslado entre taladros se reduce en 1,32 minutos, pasando de 5,07 minutos (manual) a 3,75 minutos (autónomo), lo que representa una reducción del 26 %.

El tiempo de nivelación disminuye en 1,18 minutos, desde 3,73 minutos (manual) hasta 2,55 minutos (autónomo), equivalente a una mejora del 32 %.

El tiempo de propulsión se reduce en 1,58 minutos, de 4,05 minutos (manual) a 2,47 minutos (autónomo), una mejora de aproximadamente 39 %.

La precisión en posicionamiento mejora, reduciendo la desviación media en XY de 0,3484 m (manual) a 0,2381 m (autónomo), con una mejora del 31.7 % en exactitud.

En cuanto a disponibilidad operativa, el modo autónomo incrementa la disponibilidad promedio en un 17.9 % en comparación con el modo manual, alcanzando

La proyección de utilización para el periodo 2024-2034 indica que la autonomía mantiene un porcentaje de utilización superior al manual durante toda la vida útil de la mina, con un máximo de 68.7 % en 2029, frente a 57.6 % en 2024.

Desde el punto de vista económico, aunque la inversión inicial (CAPEX) para la autonomía es un 102 % mayor, esta se recupera a mediano plazo gracias a una reducción en el costo operativo (OPEX) de más de USD 16 millones. La autonomía permite una mayor productividad laboral, con un operador supervisando hasta 2.5 equipos por turno, reduciendo costos de personal. Además, se obtienen ahorros significativos en consumo energético (10.35 %) y combustible (14.61 %) por optimización de equipos y ciclos.

La operación autónoma presenta un costo por metro perforado aproximadamente 10 % menor que la operación manual, sustentando su mayor eficiencia y sostenibilidad financiera.

En síntesis, el modo autónomo incrementa la productividad, reduce tiempos y costos, mejora la precisión operativa y refuerza la seguridad. Estos beneficios sostenibles permiten recuperar la inversión inicial en el mediano plazo y consolidar la innovación en la mina. Además, impulsa la inclusión, el desarrollo del personal y la gestión basada en datos en tiempo real, posicionando a la operación como un referente en la industria.

En conjunto, estos resultados confirman que la autonomía es una estrategia sólida frente a los retos y demandas futuras del proyecto minero Antapaccay, marcando un hito para la unidad minera.

## **Recomendaciones**

Implementar progresivamente sistemas autónomos en perforación. Dado el incremento en productividad y reducción significativa de costos y tiempos (entre 26 % y 39 % en tiempos clave), se recomienda escalar la adopción de tecnologías autónomas en las perforadoras, priorizando equipos con mayor potencial de ahorro energético y mejora operativa.

Fortalecer capacitación técnica y soporte para operadores. La transición a operaciones autónomas requiere formación continua y programas de actualización para el personal, asegurando que los operadores puedan supervisar múltiples equipos eficientemente y gestionen correctamente el sistema, maximizando los beneficios de la autonomía.

Invertir en infraestructura tecnológica adecuada. La inversión en sistemas de comunicación, sensores y software especializado debe mantenerse y actualizarse para garantizar la estabilidad y seguridad del sistema autónomo, dado que la variabilidad en disponibilidad aumenta por dependencia tecnológica.

Monitorear continuamente KPIs operativos y de seguridad. Se recomienda establecer un sistema de seguimiento en tiempo real para indicadores clave como velocidad de perforación, tiempos de traslado y nivelación, disponibilidad, y precisión, permitiendo ajustes rápidos y manteniendo los niveles óptimos de operación.

Optimizar la planificación de recursos humanos y energéticos. Aprovechar la capacidad de supervisar múltiples equipos para reducir costos laborales, y fomentar el uso de perforadoras eléctricas para reducir consumo de combustible y emisiones, apoyando la sustentabilidad del proyecto.

Considerar la autonomía como una inversión a mediano plazo. Aunque el CAPEX inicial es mayor, la reducción del OPEX y mejoras en productividad justifican la inversión. Se recomienda planificar el presupuesto considerando la recuperación de costos en el mediano plazo.

Desarrollar planes de mantenimiento predictivo basados en datos. Utilizar la mayor cantidad y calidad de datos generados por el sistema autónomo para implementar mantenimiento preventivo y predictivo, reduciendo tiempos muertos y extendiendo la vida útil de los equipos.

Fomentar la inclusión y desarrollo del personal. La automatización debe complementarse con oportunidades de formación y desarrollo para el personal, promoviendo la inclusión y preparando a los trabajadores para nuevas funciones dentro del ecosistema tecnológico.

## Referencias bibliográficas

- Andreas, L., & Lokkevik. (2019). *Optimización de un equipo de perforación autónomo inteligente* [Tesis de maestría, Facultad de Ciencias y Tecnología]. NTNU Open.  
<http://hdl.handle.net/11250/2634127>
- Cámara de Comercio de Lima. (2021). *La Cámara: Informe sobre la automatización en el sector minero: Productividad y sostenibilidad*. <https://www.camaralima.org.pe/wp-content/uploads/2021/05/10-05-2021-La-Camara-1.pdf>
- Camarena, C. (2019). *Optimización de los rendimientos de perforación a partir del modelo geotécnico con fines de minimizar costos de perforación en la Compañía Minera Antamina* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].  
Repositorio UNCP.  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/20.500.12894/4966/1/T010\\_70261801\\_T.pdf](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/20.500.12894/4966/1/T010_70261801_T.pdf)
- Caterpillar Inc. (s.f.). *MD6540 perforadora giratoria – Ficha técnica*.  
<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10295738>
- Caterpillar Inc. (s.f.). *MD6640 Perforadora giratoria – Especificaciones y características técnicas*. [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/equipment/drills/rotary-drills/18279659.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/drills/rotary-drills/18279659.html)
- Cooke, D. R., Holliday, J. R., & Baker, E. A. (2020). *Innovations in Mining Operations and Technologies*. Elsevier.
- Cooke, R., Fourie, A., & Jones, T. (2020). The application of automated mining technologies. In *Proceedings of the International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 123-130). Springer.
- Dasha, O (2021). *Impacto económico de la implementación de equipos robóticos y teleoperados en la minería a cielo abierto* [Tesis de maestría, Universidad de Chile].  
Repositorio UChile.  
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/180277/Impacto-economico-de->

[laimplementacion-de-equipos-roboticos-y-teleoperados-en-la-mineria-a-cieloabierto.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

Epiroc AB. (s.f.). *Pit Viper 351 – Especificaciones y capacidades de perforación.*

<https://www.epiroc.com/es-bo/products/drill-rigs/surface-blasthole-drill-rigs/pv-351>

Ferreyros S.A. (s.f.). *Perforadora Rotativa MD6540 – Ficha técnica.*

<https://www.ferreyros.com.pe/equipo/perforadora-rotativa-md6640/?parent=3212>

Guillen, S (2020). *Optimización del diseño de malla de perforación para la estimación de costos operacionales en la zona de Pucaurco - Unidad Minera Pachancoto - Minas de Pachancoto S.A. 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio

Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8425>

Hamanaka, T. (2011). Advances in mining safety: Reducing human error through automation. *Journal of Mining Technology*, 28(4), 457-471.

Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. Wiley.

Hernandez, C (2018). *Análisis de costes de producción con implementación de equipos automatizados tomando como ejemplo Mina Magdalena* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio UPM.

[https://oa.upm.es/49610/1/PFG\\_Carlos\\_Andres\\_Hernandez\\_Fuenrealba.pdf](https://oa.upm.es/49610/1/PFG_Carlos_Andres_Hernandez_Fuenrealba.pdf)

Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design*. CRC Press.

International Society of Automation (ISA). (2012). *The automation in mining: Technology for sustainability*. ISA Press.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2024). *Sector minería e hidrocarburos aumentó 15,94% en febrero de 2024.*

<https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/sector-mineria-e-hidrocarburos-aumento-1594-en-febrero-de-2024-15102/>

ISA. (2020). *Advances in sustainable mining technology*. ISA Prss.

Jáuregui, A (2009) *Reducción de los costos operativos en mina, mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de perforación y voladura* [Tesis de

- pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/696>
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press.
- Koederitz, W. L., & Johnson, W. E. (2011, marzo). *Real-time optimization of drilling parameters by autonomous empirical methods*. En *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/139849-MS>
- Komatsu Mining Corp. (s.f.). *H 320XPC rotary blasthole drill – Product overview*. <https://www.komatsulatioamerica.com/chile/productos/ph-320xpc/>
- Ouchterlony, F. (1992). The Swabrec© function: Linking fragmentation by blasting and crushing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 29(3), 345-355
- Perelló, J., Carmona, L., & Gómez, P. (2015). *Blast optimization in open pit mining*. Springer.
- Perelló, J., Cooke, D. R., & Hollings, P. (2015). *Global distribution of porphyry Cu deposits and exploration considerations: A review*. In *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 409-436). Society of Economic Geologists.
- Quellaveco (2018). *Área zona 2000: Zona de mina* [Material informativo]. Anglo American. <https://peru.angloamerican.com/es-es/quellaveco/el-proyecto>
- Sillitoe, R. H. (2010). *Porphyry copper systems*. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.

## **Anexos**

Anexo 1: Profundidad perforada – Data inicial .....	1
Anexo 2: Profundidad perforada – Data depurada .....	6
Anexo 3: Velocidad de perforación – Data depurada .....	10
Anexo 4: Disponibilidad – Data depurada .....	15
Anexo 5: Utilización – Data depurada .....	19
Anexo 6: Utilización efectiva – Data depurada .....	23

# Anexo 1: Profundidad perforada – Data inicial

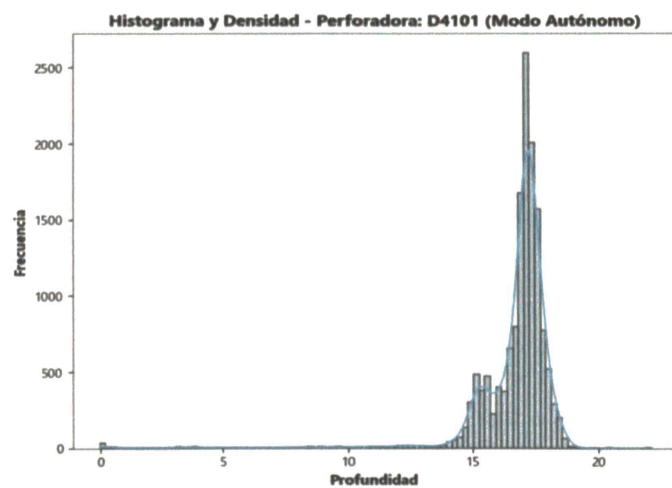
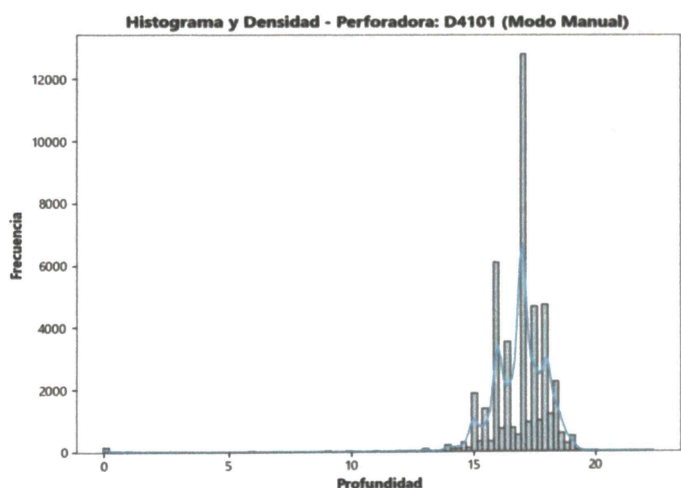


Ilustración 1 Histograma de la profundidad perforada – D4101

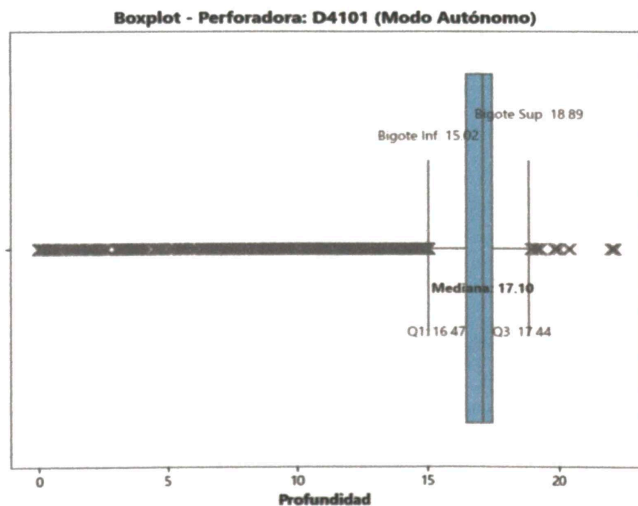
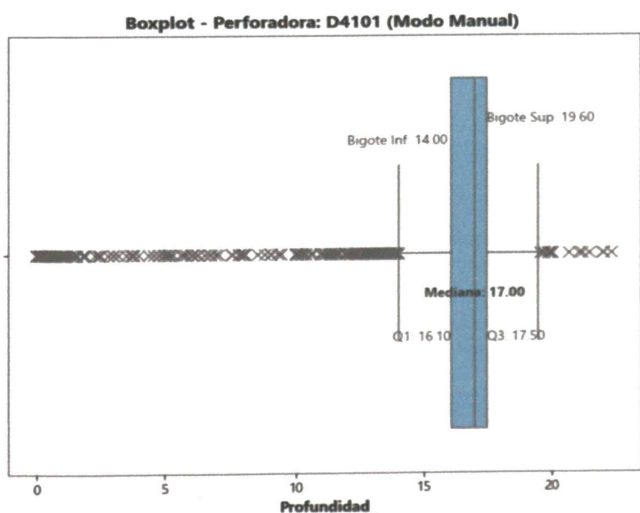


Ilustración 2 Boxplot de la profundidad perforada – D4101

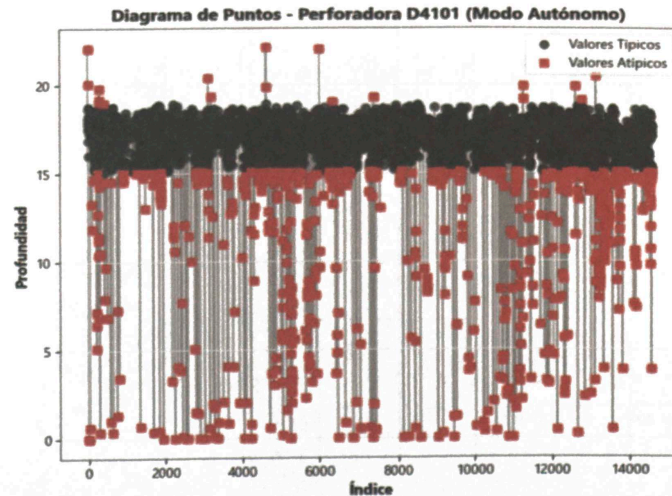
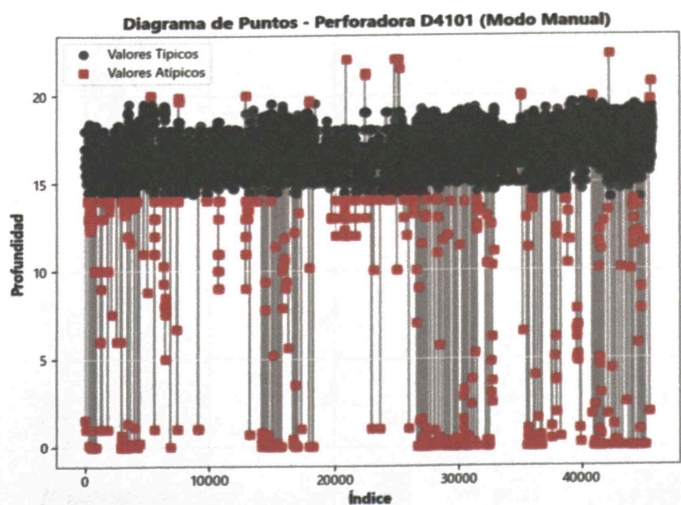


Ilustración 3 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4101

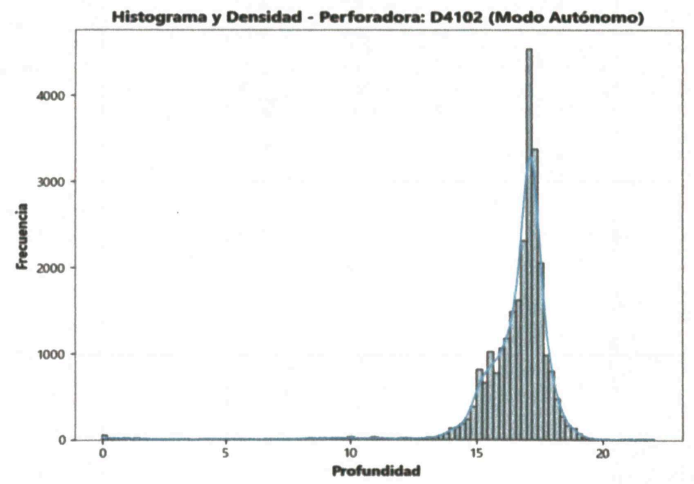
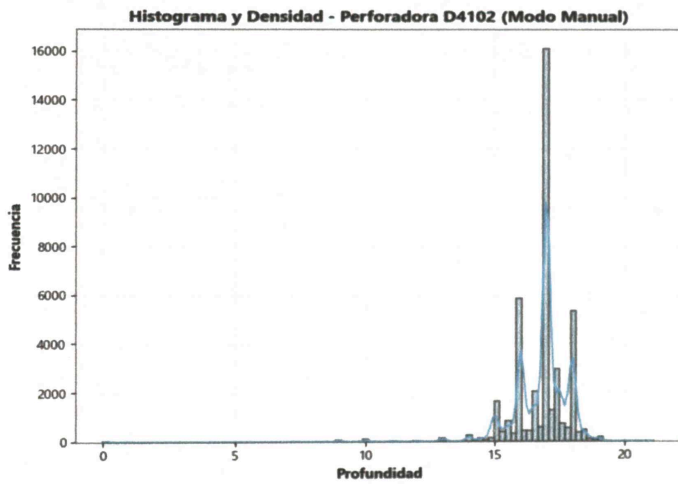


Ilustración 4 Histograma de la profundidad perforada – D4102

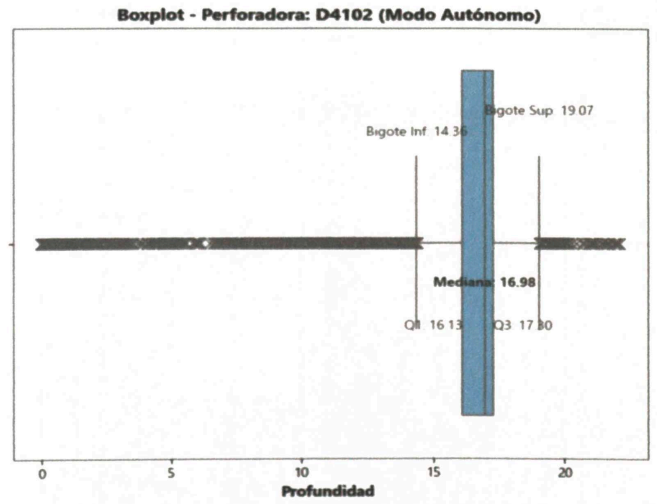
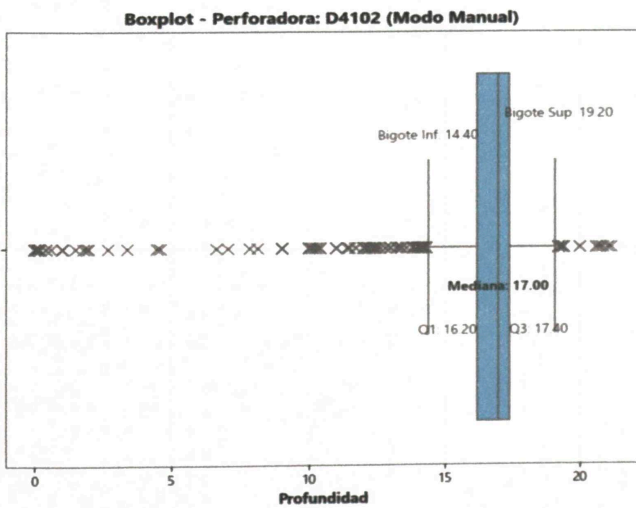


Ilustración 5 Boxplot de la profundidad perforada – D4102

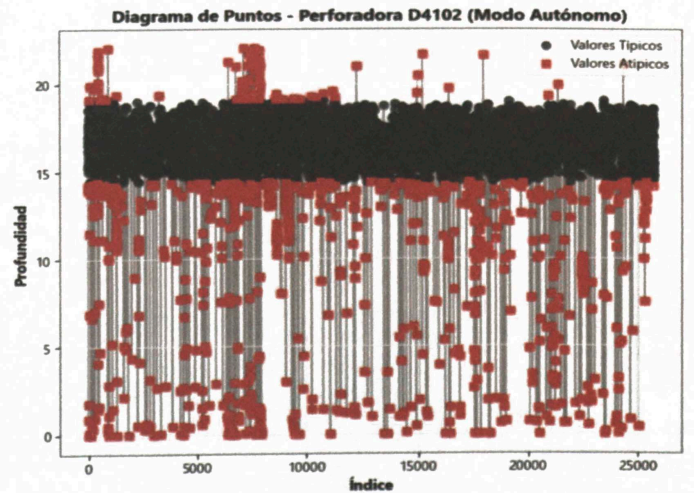
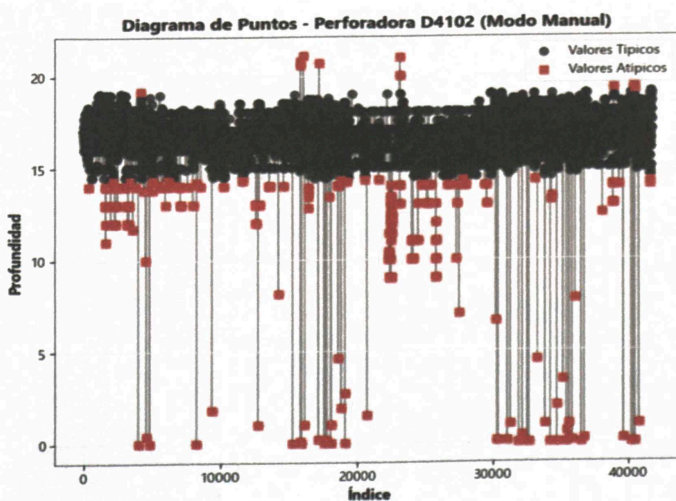
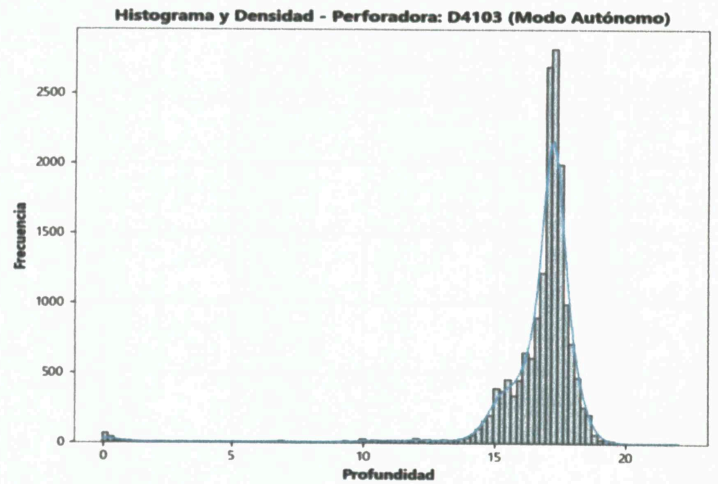
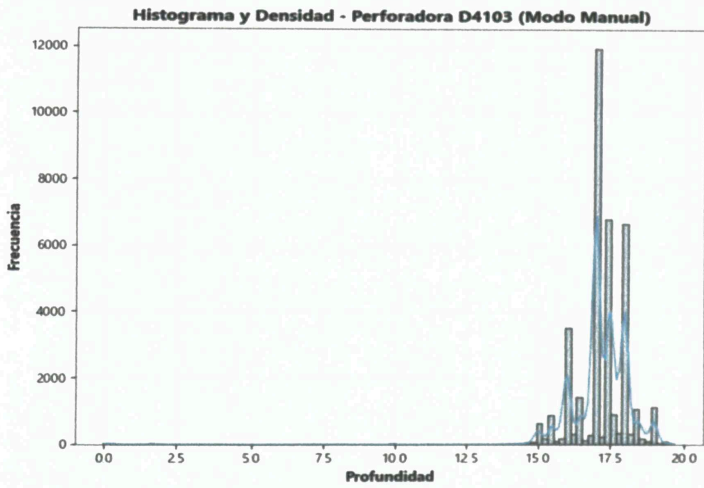
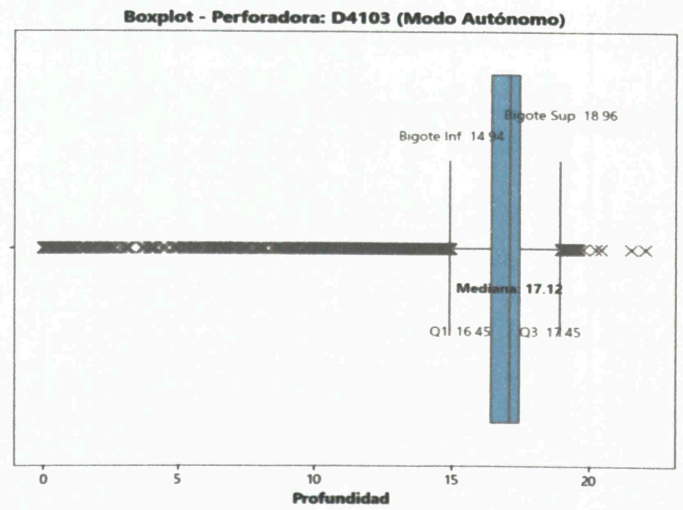
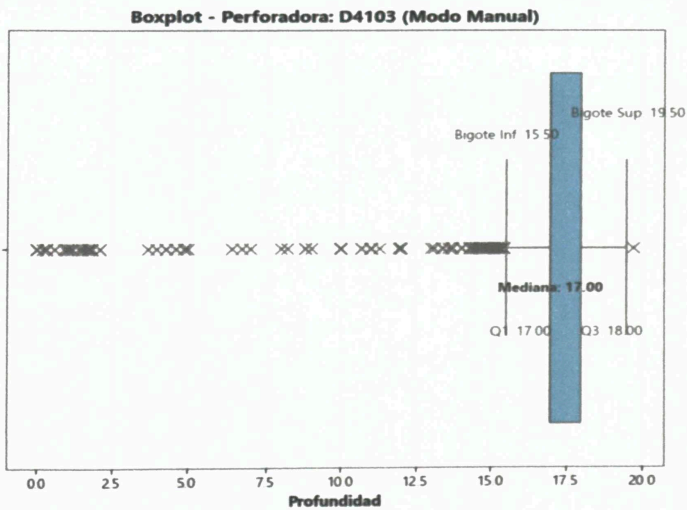


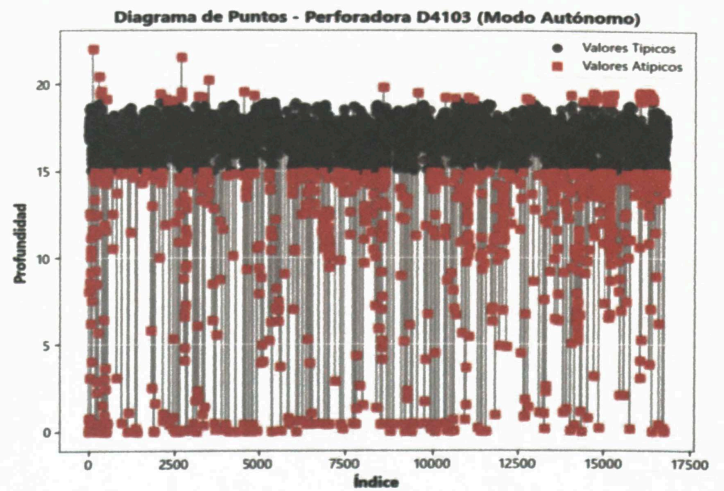
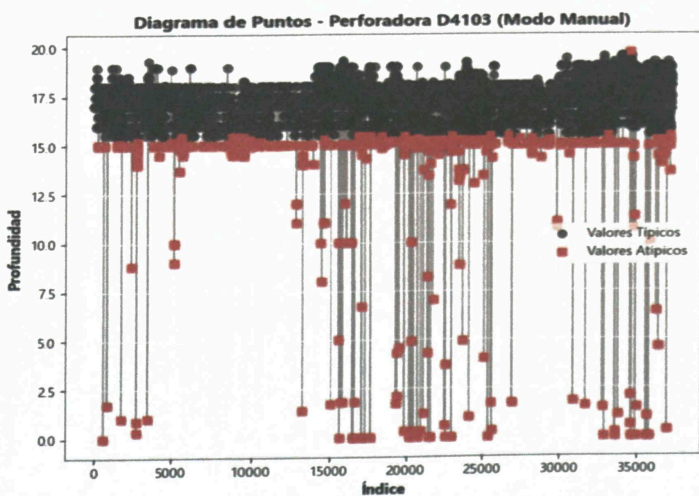
Ilustración 6 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4102



*Ilustración 7 Histograma de la profundidad perforada – D4103*



*Ilustración 8 Boxplot de la profundidad perforada – D4103*



*Ilustración 9 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4103*

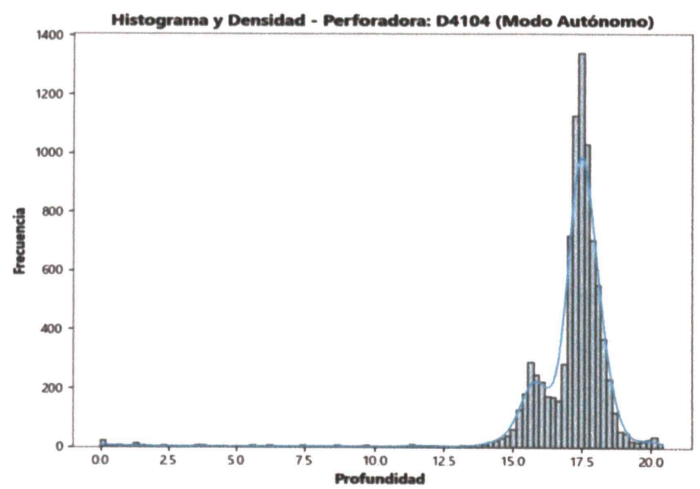
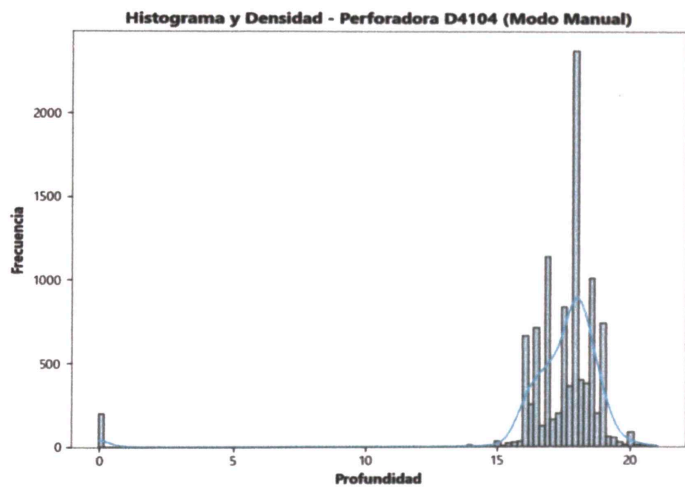


Ilustración 10 Histograma de la profundidad perforada – D4104

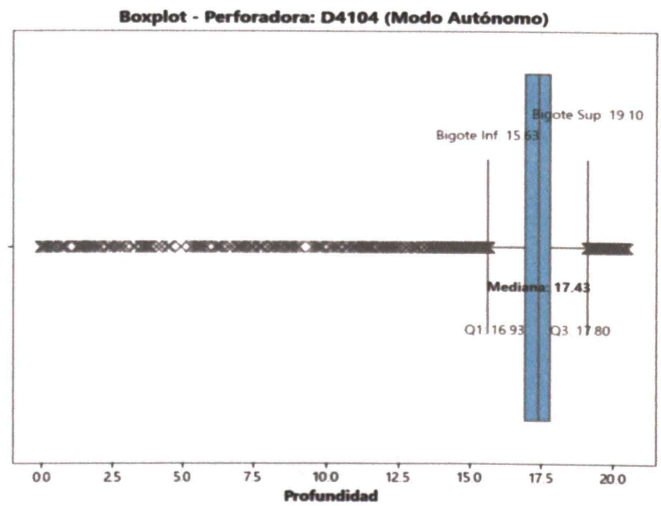
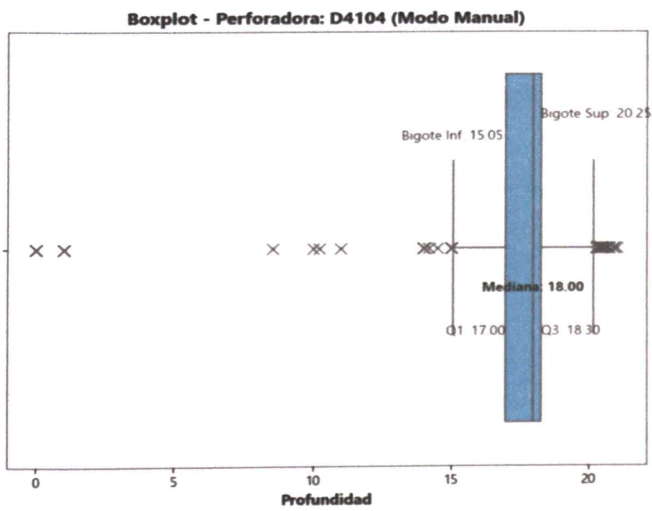


Ilustración 11 Boxplot de la profundidad perforada – D4104

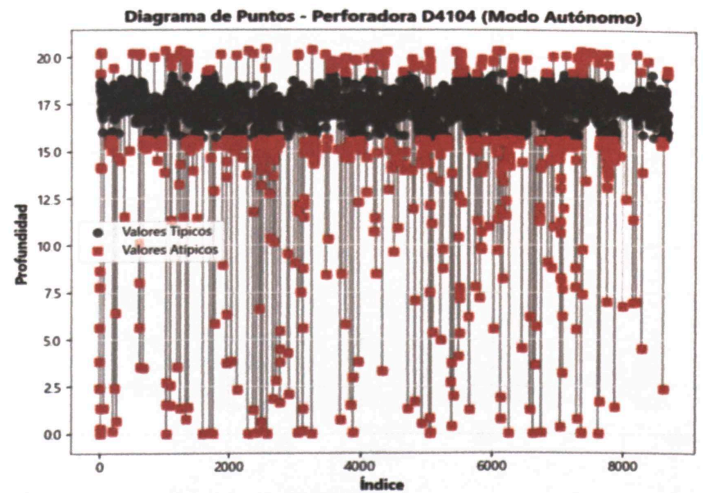
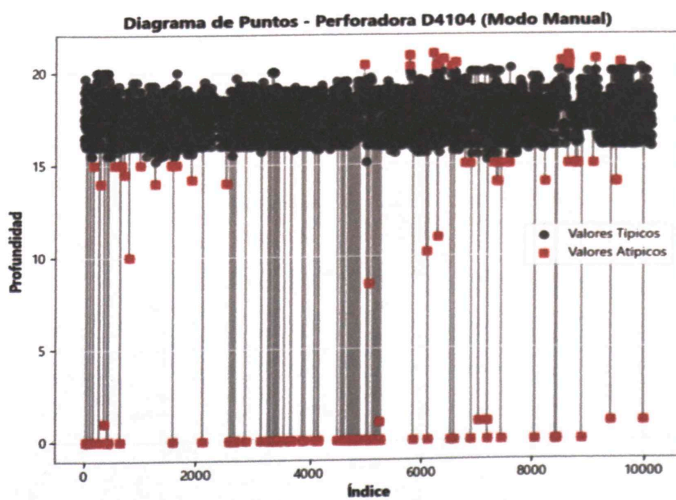


Ilustración 12 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4104

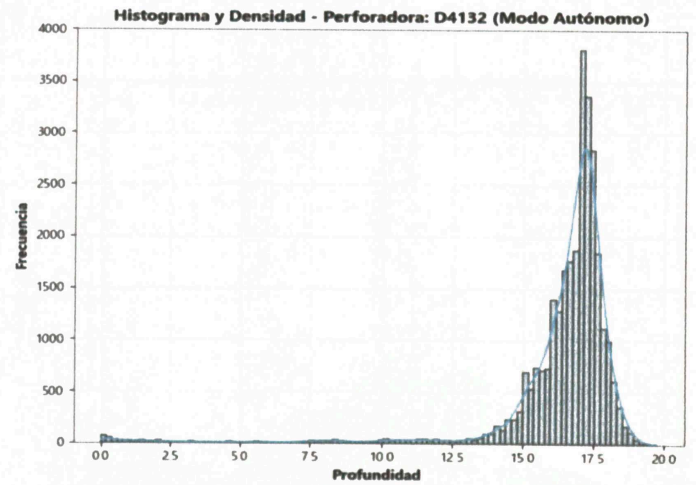
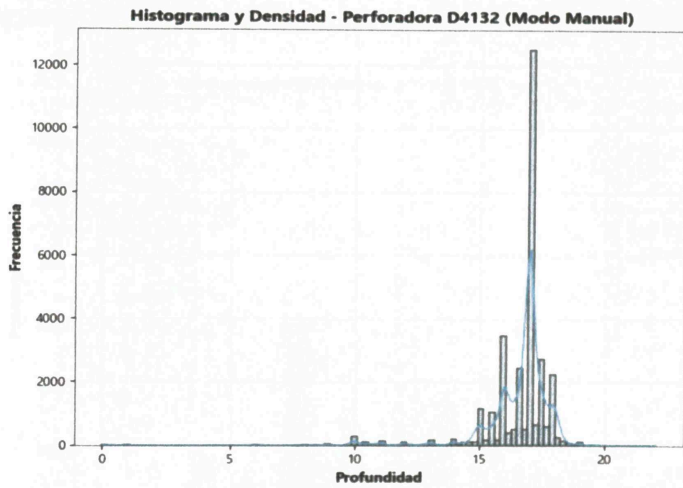


Ilustración 13 Histograma de la profundidad perforada – D4132

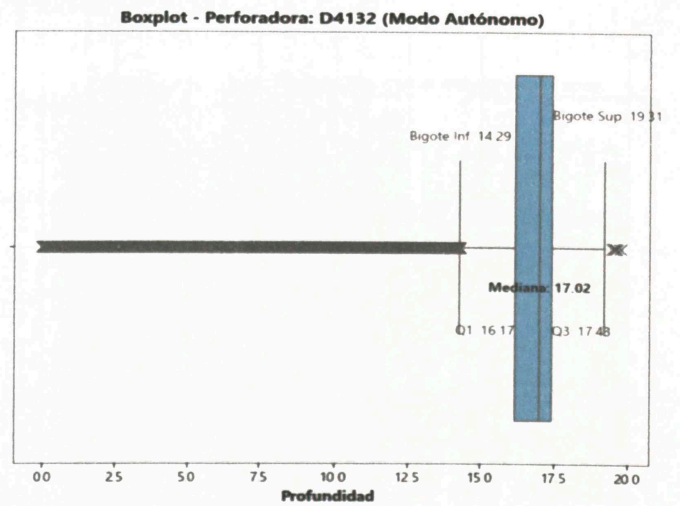
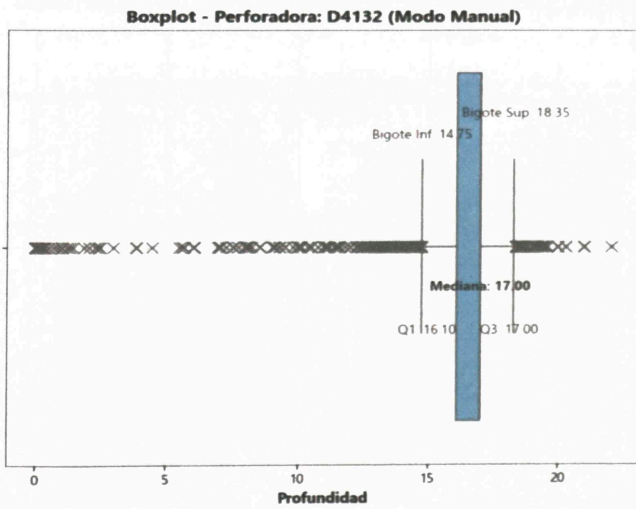


Ilustración 14 Boxplot de la profundidad perforada – D4132

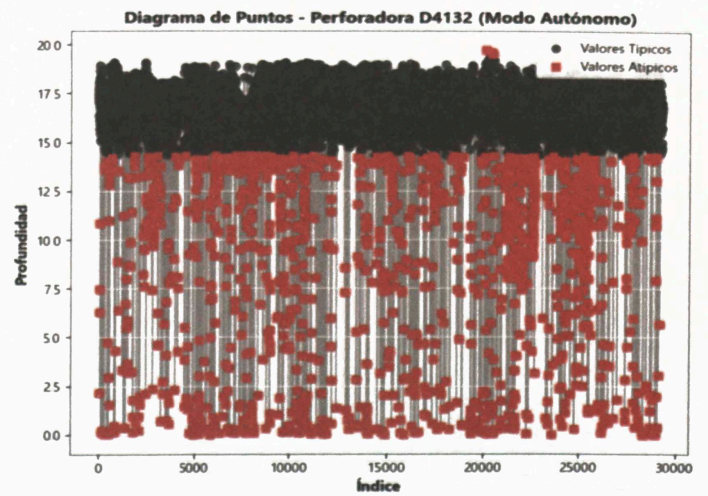
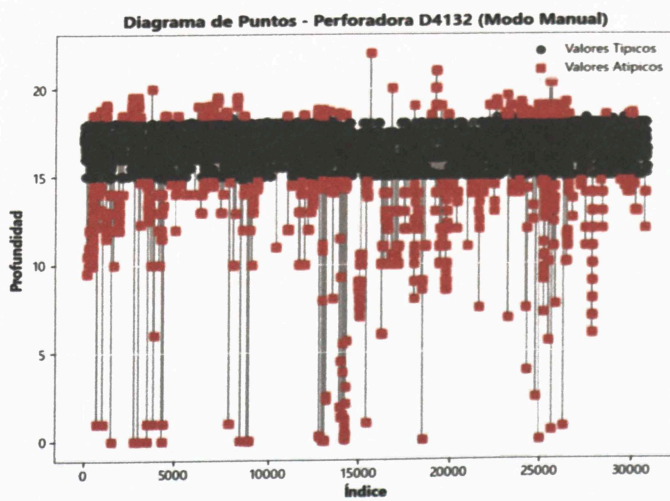


Ilustración 15 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4132

## Anexo 2: Profundidad perforada – Data depurada

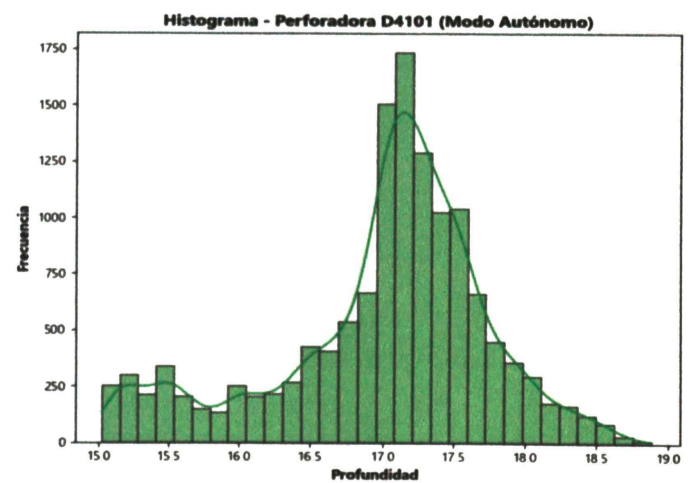
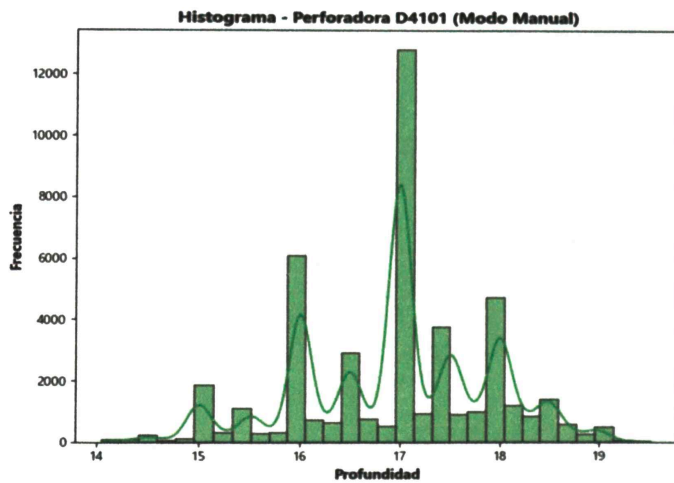


Ilustración 16 Histograma de la profundidad perforada – D4101

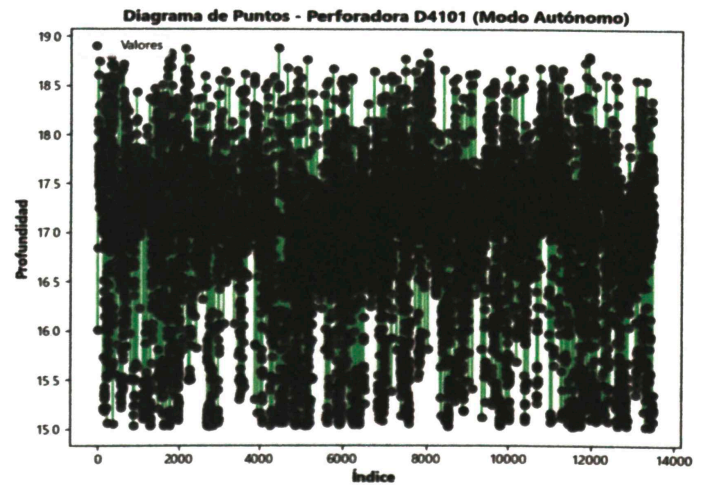
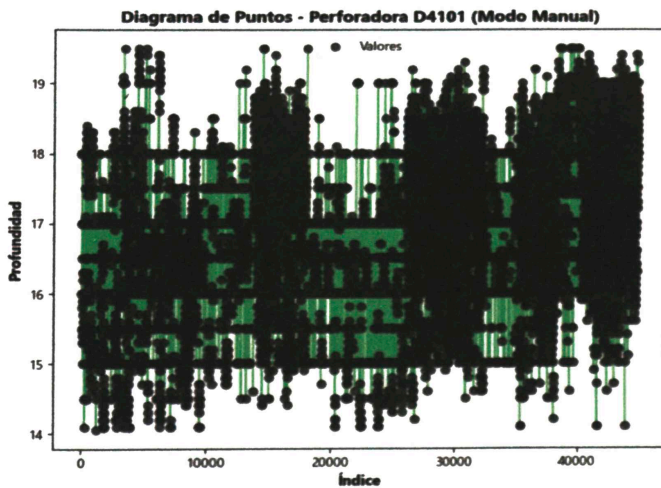


Ilustración 17 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4101

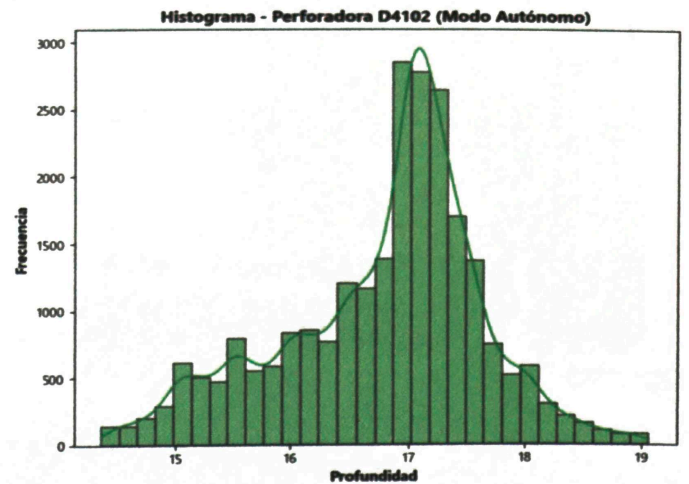
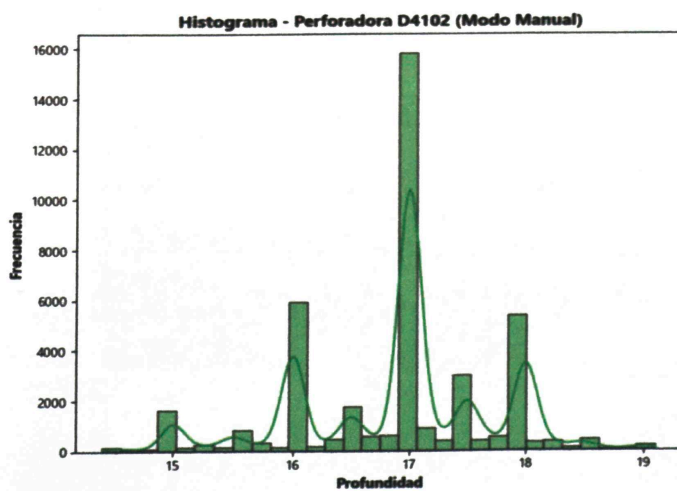


Ilustración 18 Histograma de la profundidad perforada – D4102

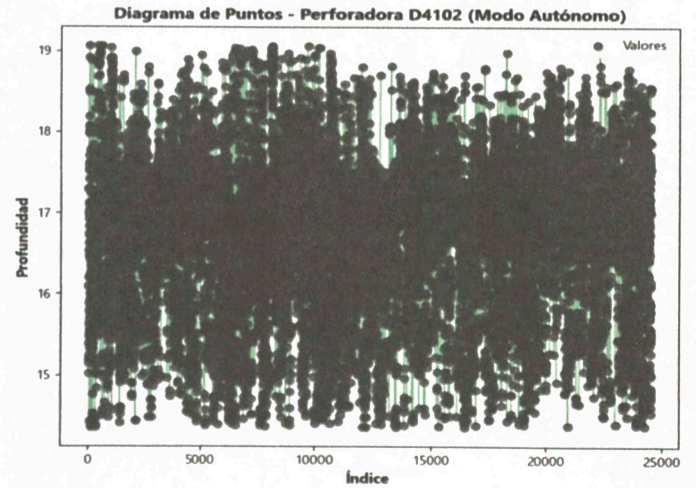
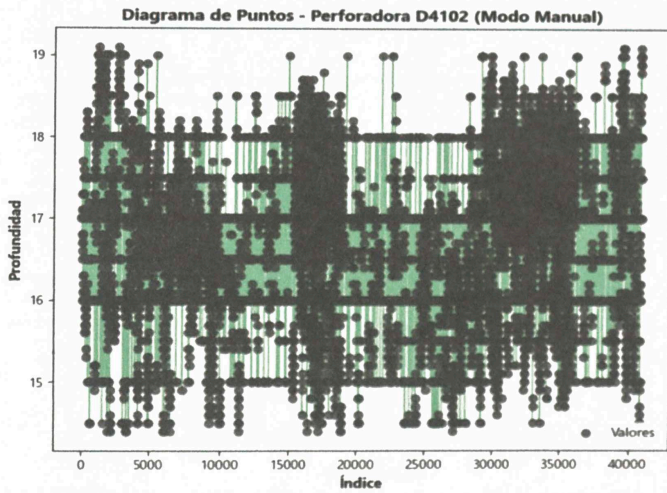


Ilustración 19 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4102

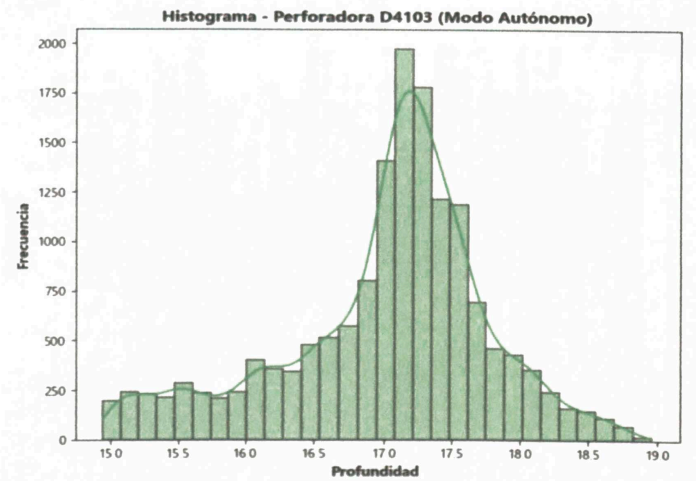
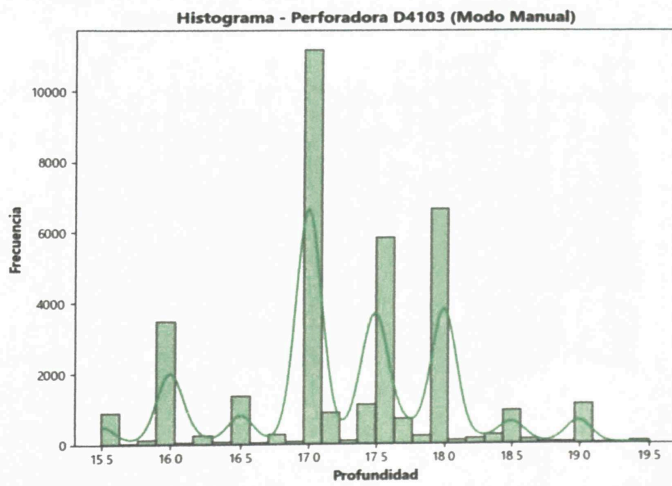


Ilustración 20 Histograma de la profundidad perforada – D4103

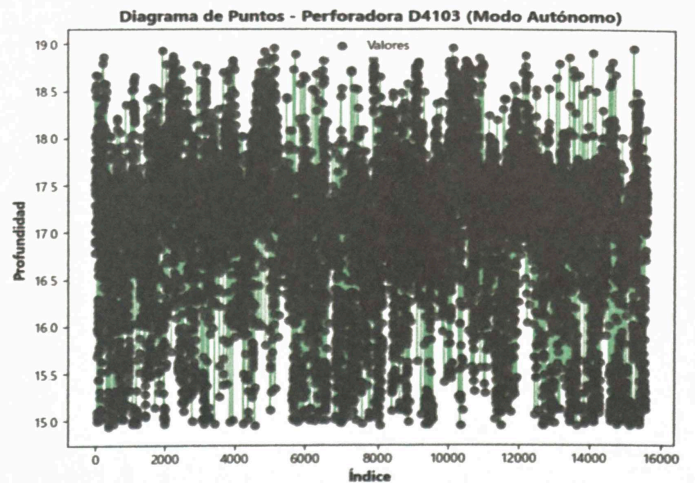
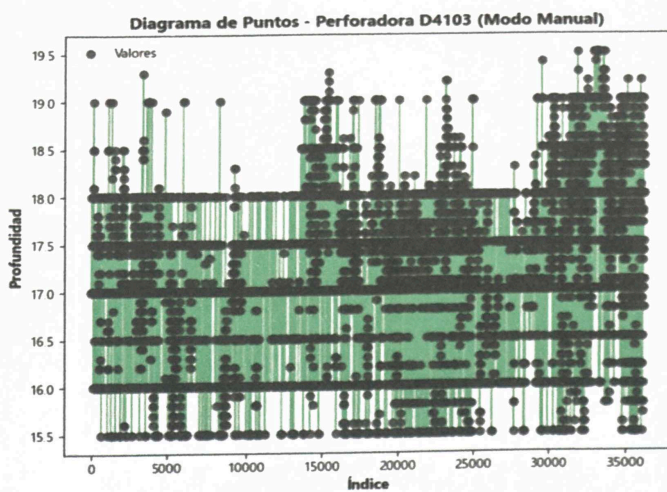
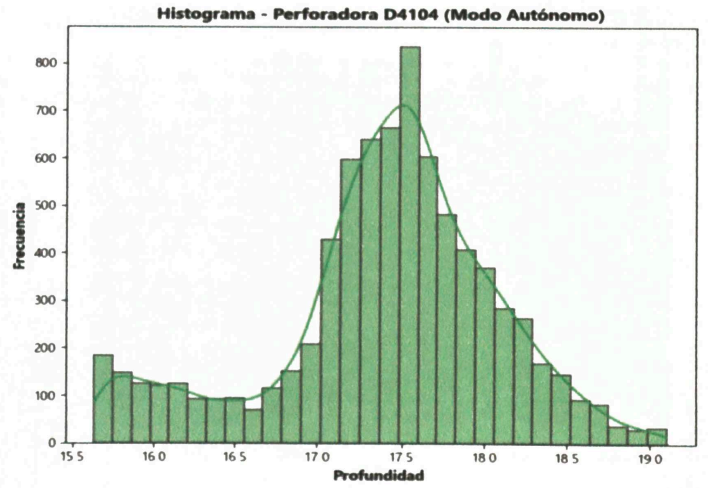
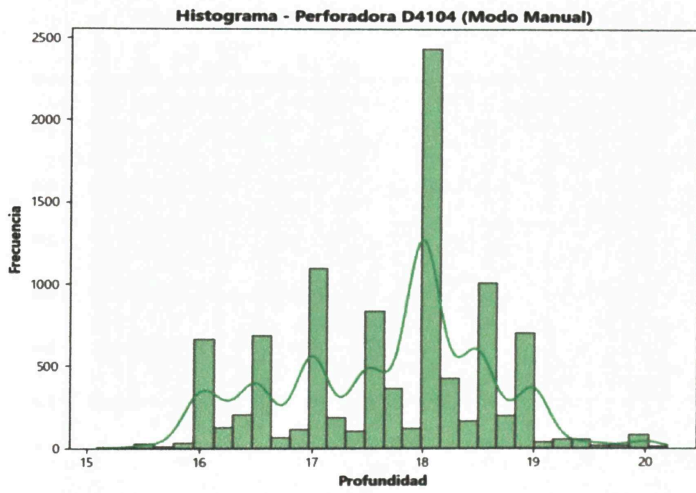
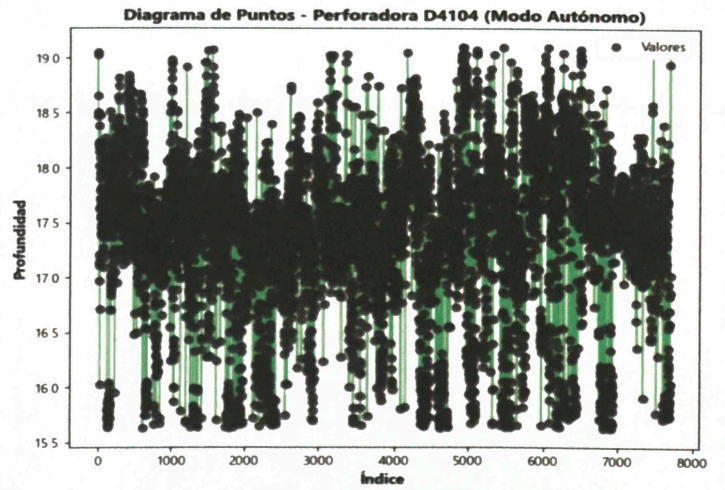
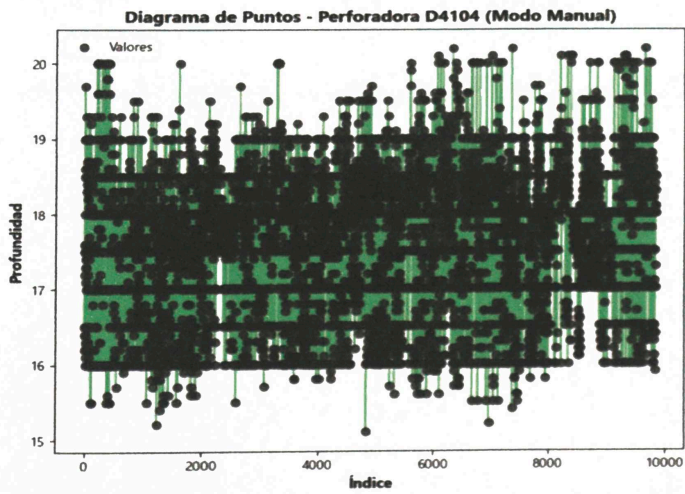


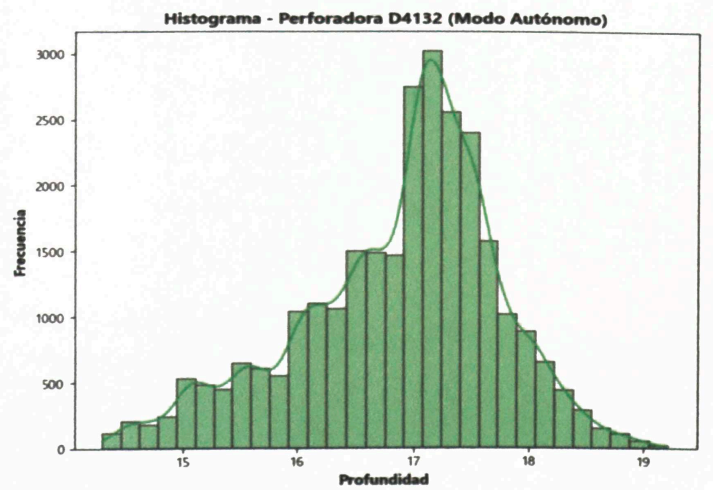
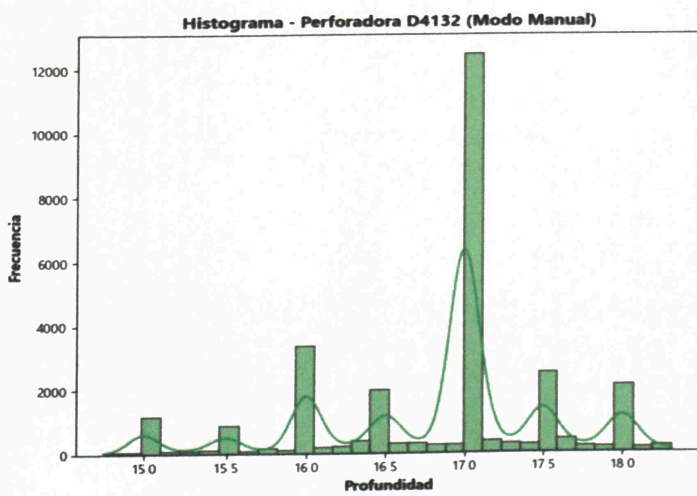
Ilustración 21 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4103



*Ilustración 22 Histograma de la profundidad perforada – D4104*



*Ilustración 23 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4104*



*Ilustración 24 Histograma de la profundidad perforada – D4132*

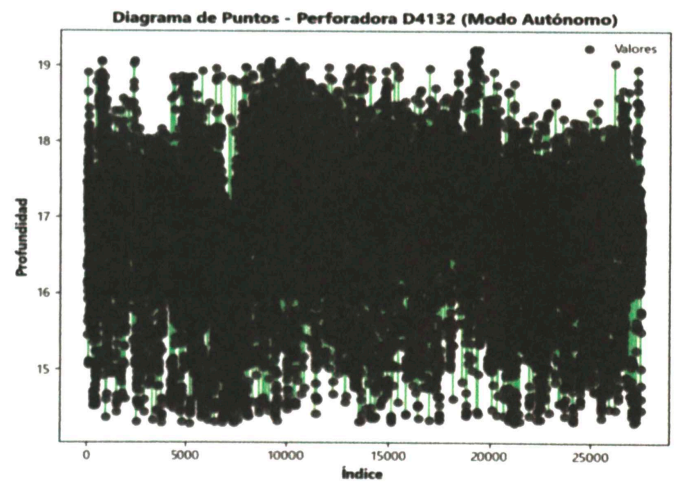
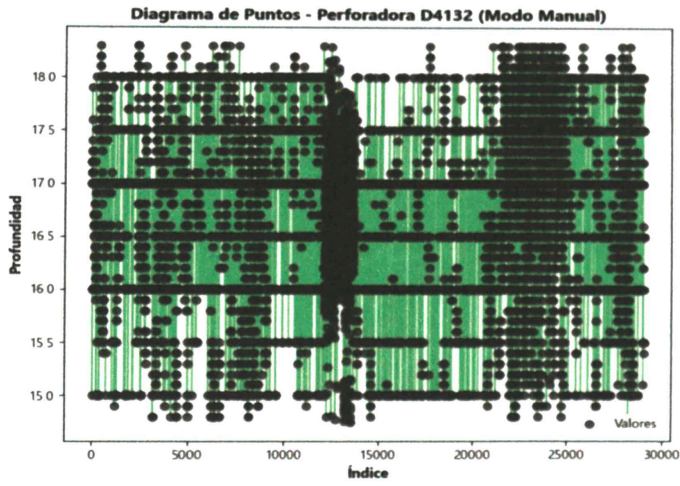


Ilustración 25 Diagrama de puntos de la profundidad perforada – D4132

Anexo 3: Velocidad de perforación – Data depurada

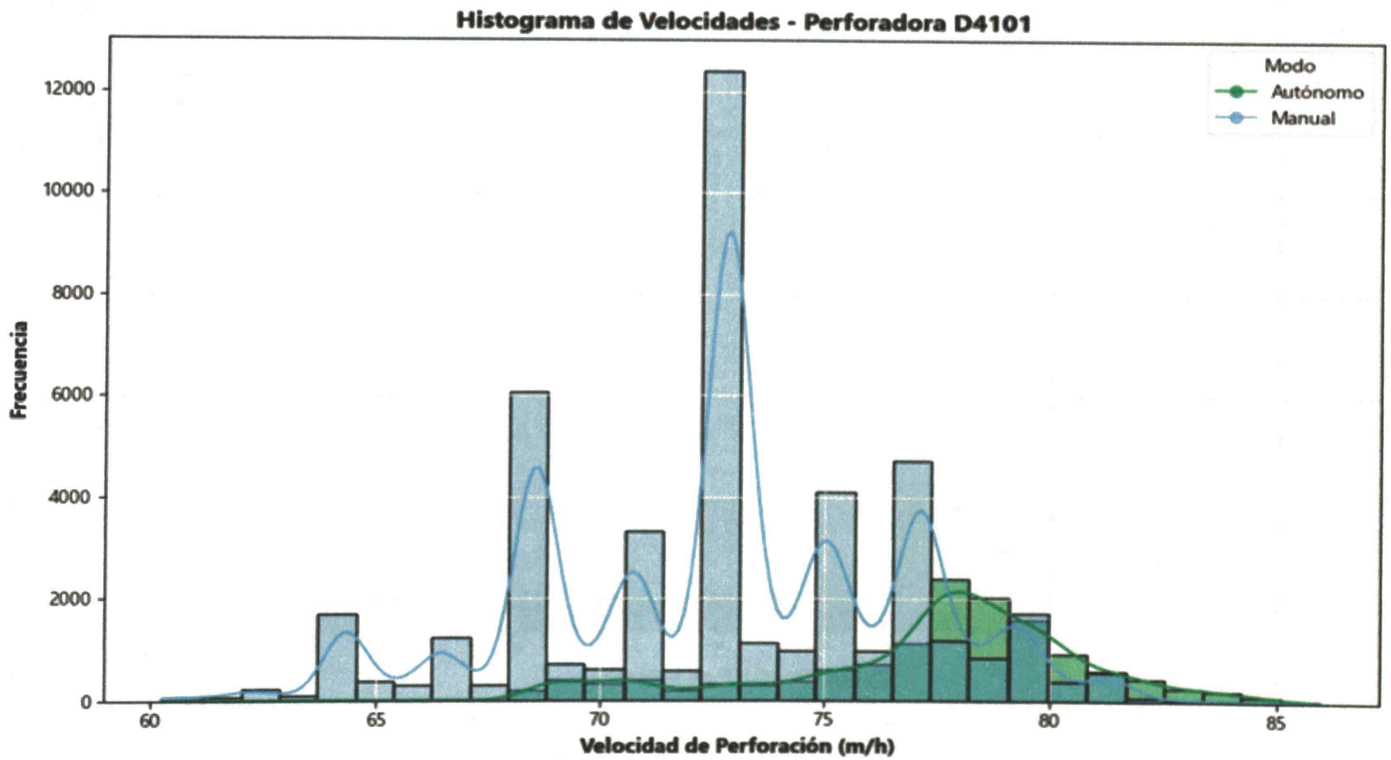


Ilustración 26 Histograma de velocidad de perforación – D4101

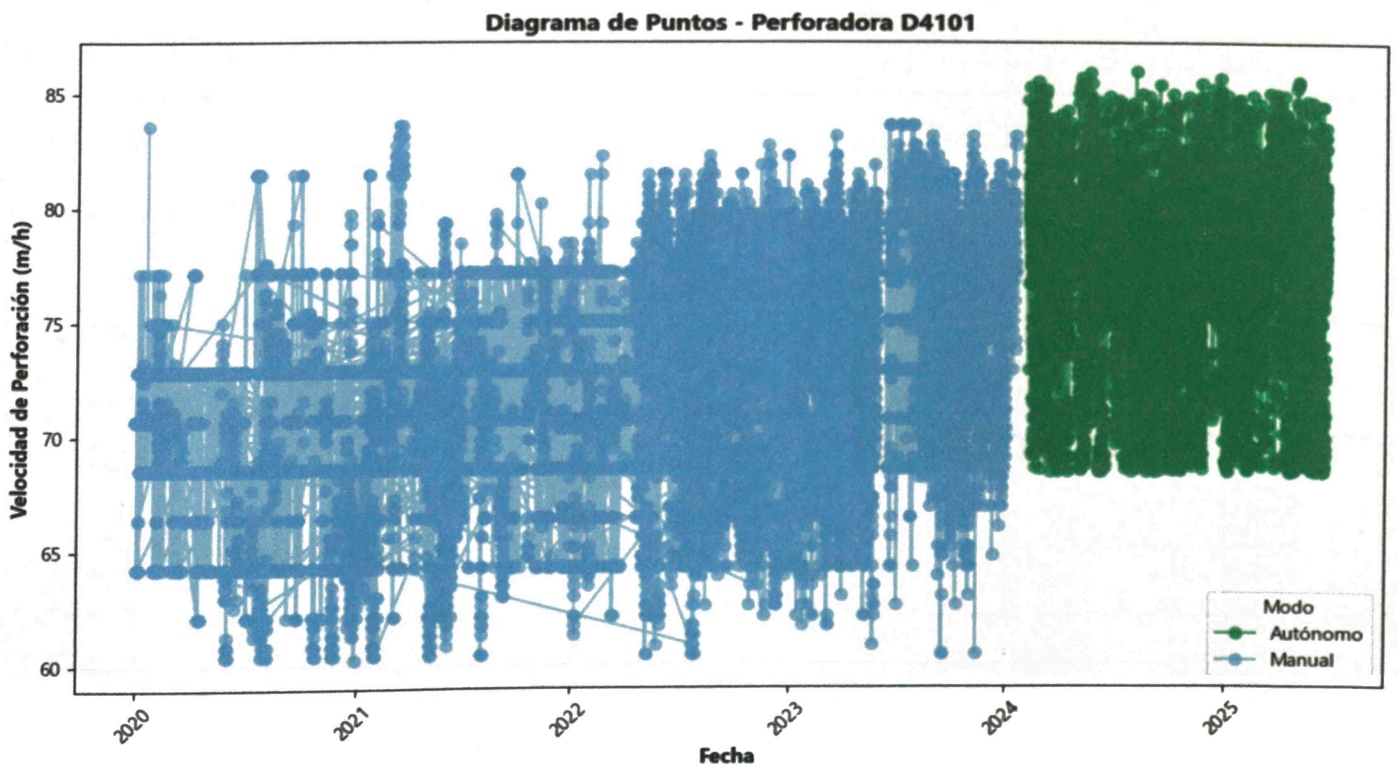
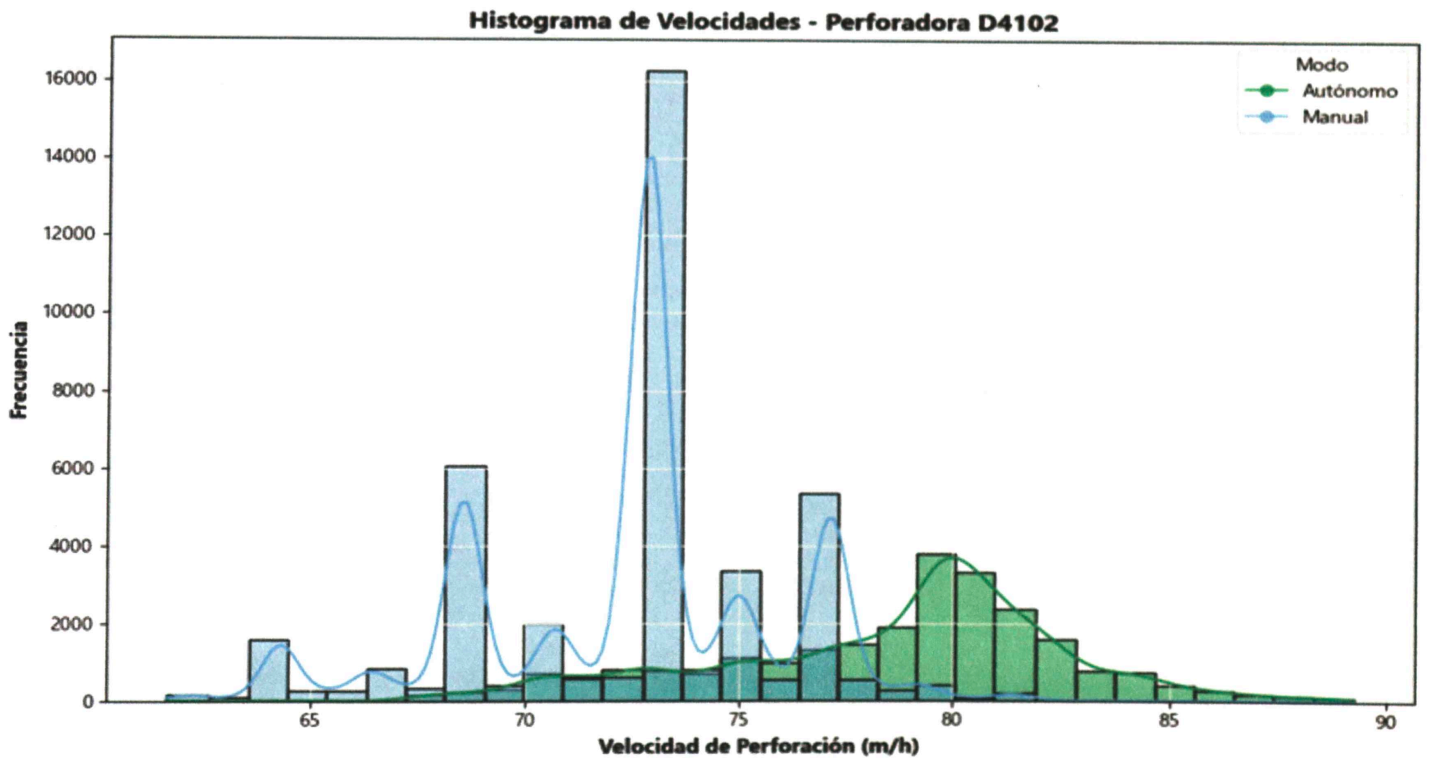
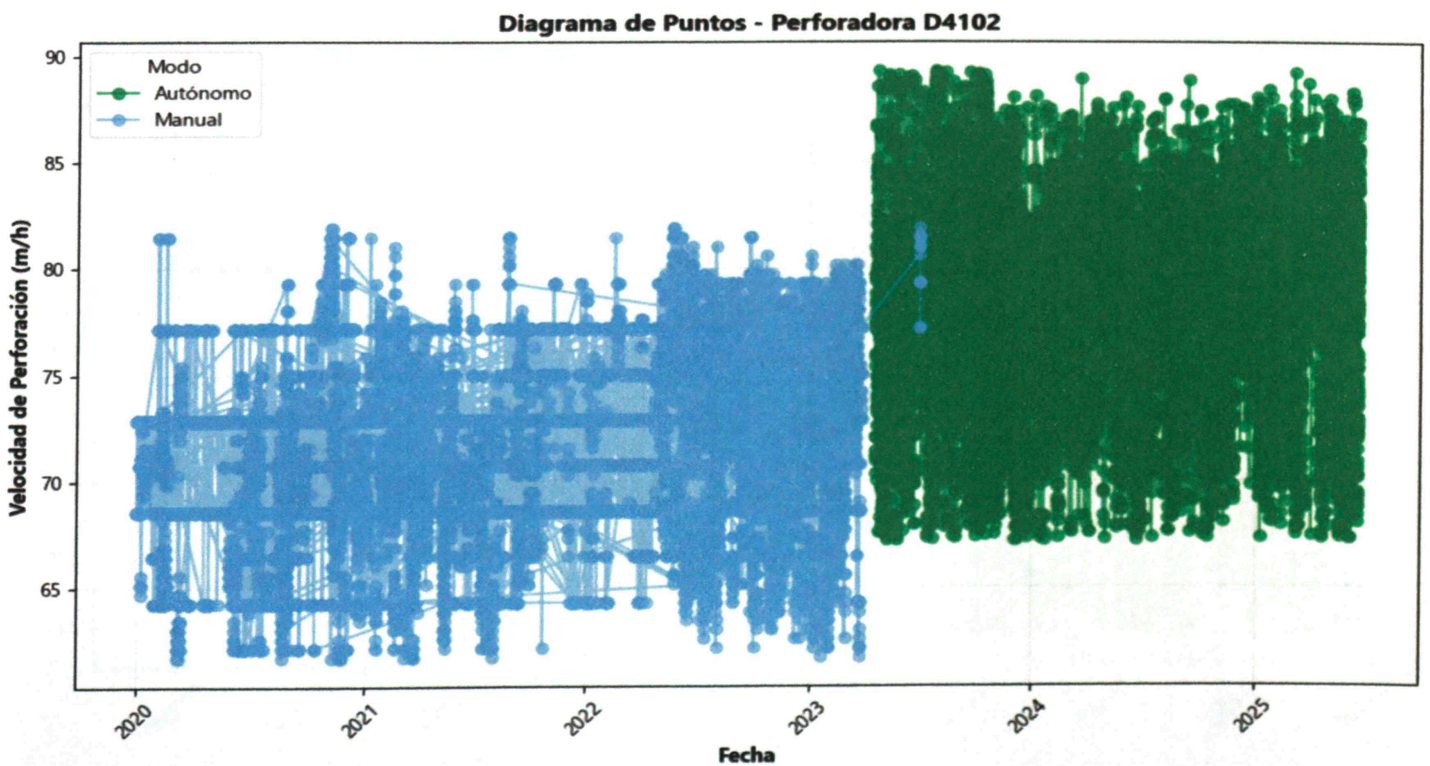


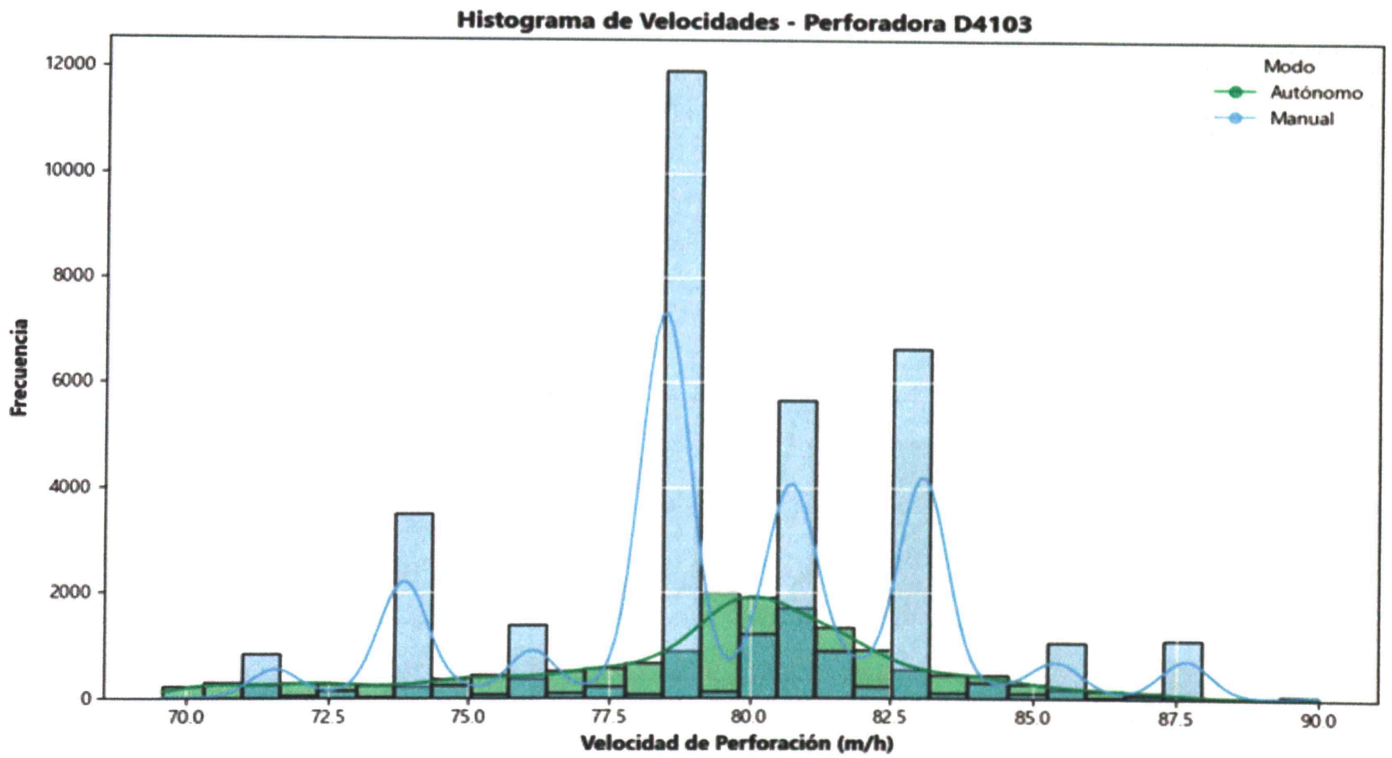
Ilustración 27 Diagrama de puntos de velocidad de perforación – D4101



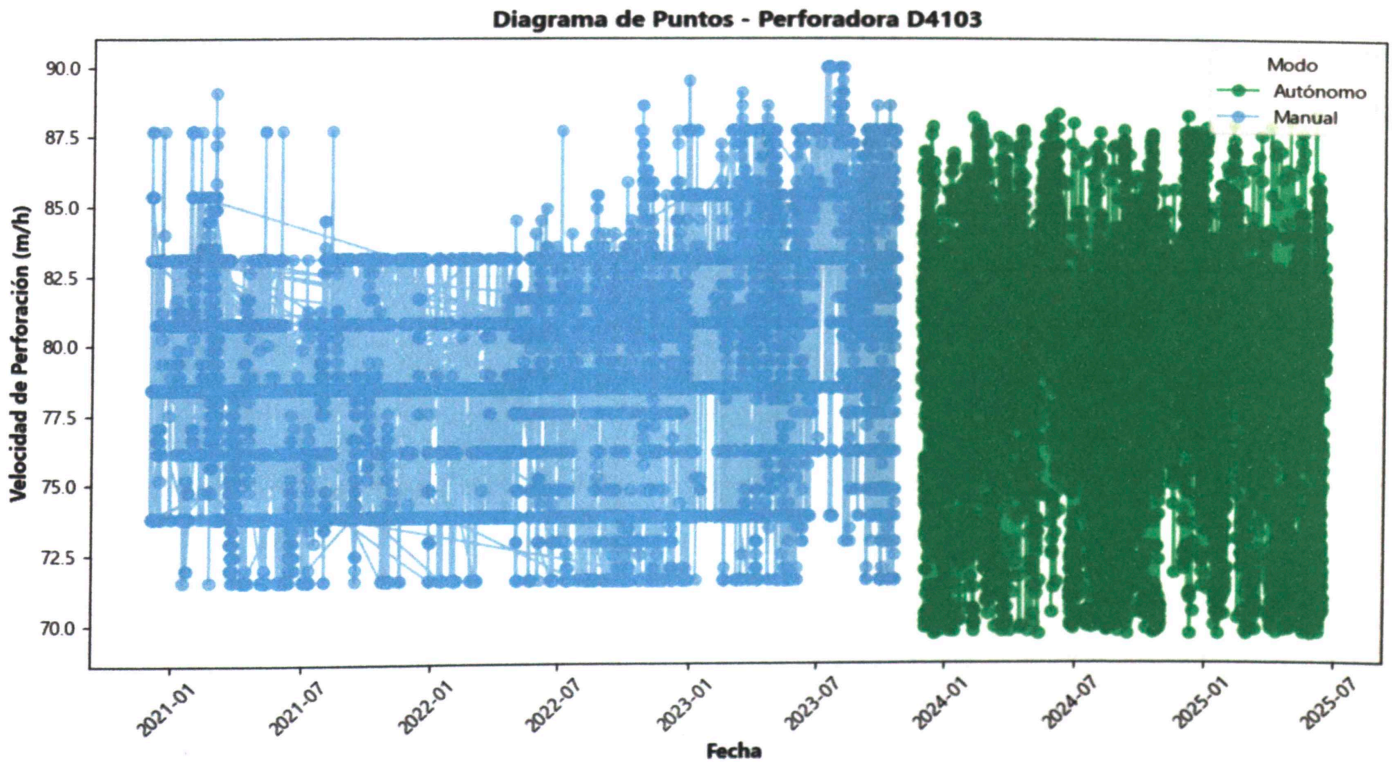
Ilustraci3n 28 Histograma de velocidad de perforaci3n – D4102



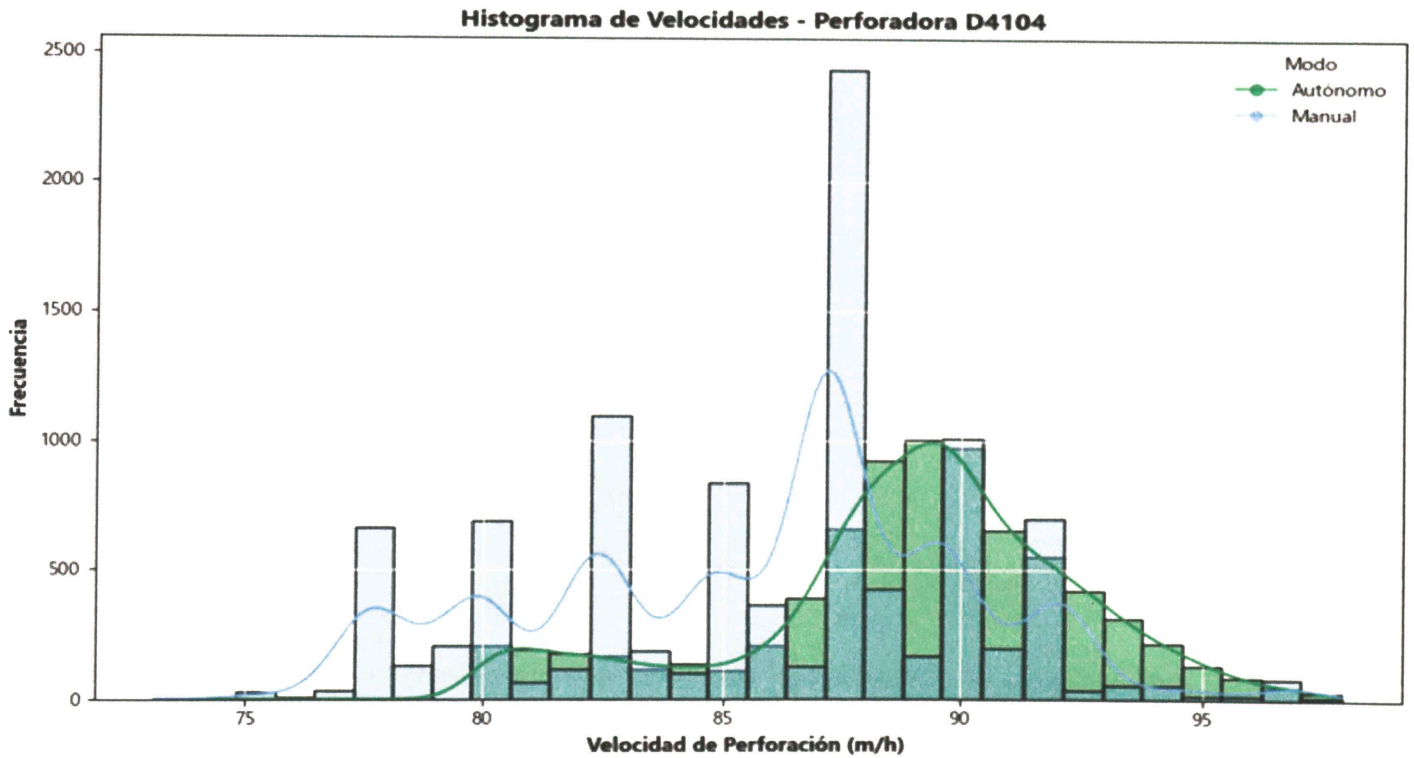
Ilustraci3n 29 Diagrama de puntos de velocidad de perforaci3n – D4102



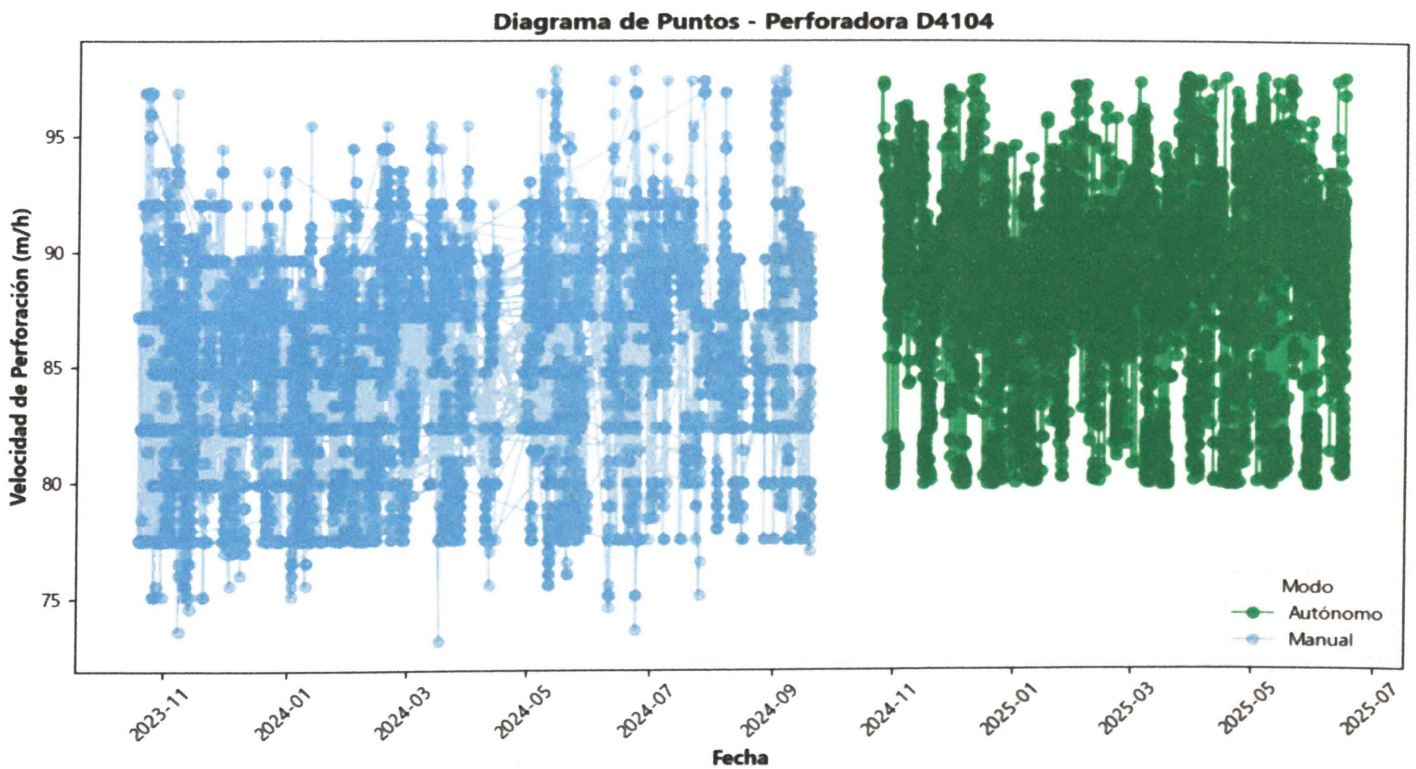
Ilustraci3n 30 Histograma de velocidad de perforaci3n – D4103



Ilustraci3n 31 Diagrama de puntos de velocidad de perforaci3n – D4103



Ilustraci3n 32 Histograma de velocidad de perforaci3n – D4104



Ilustraci3n 33 Diagrama de puntos de velocidad de perforaci3n – D4104

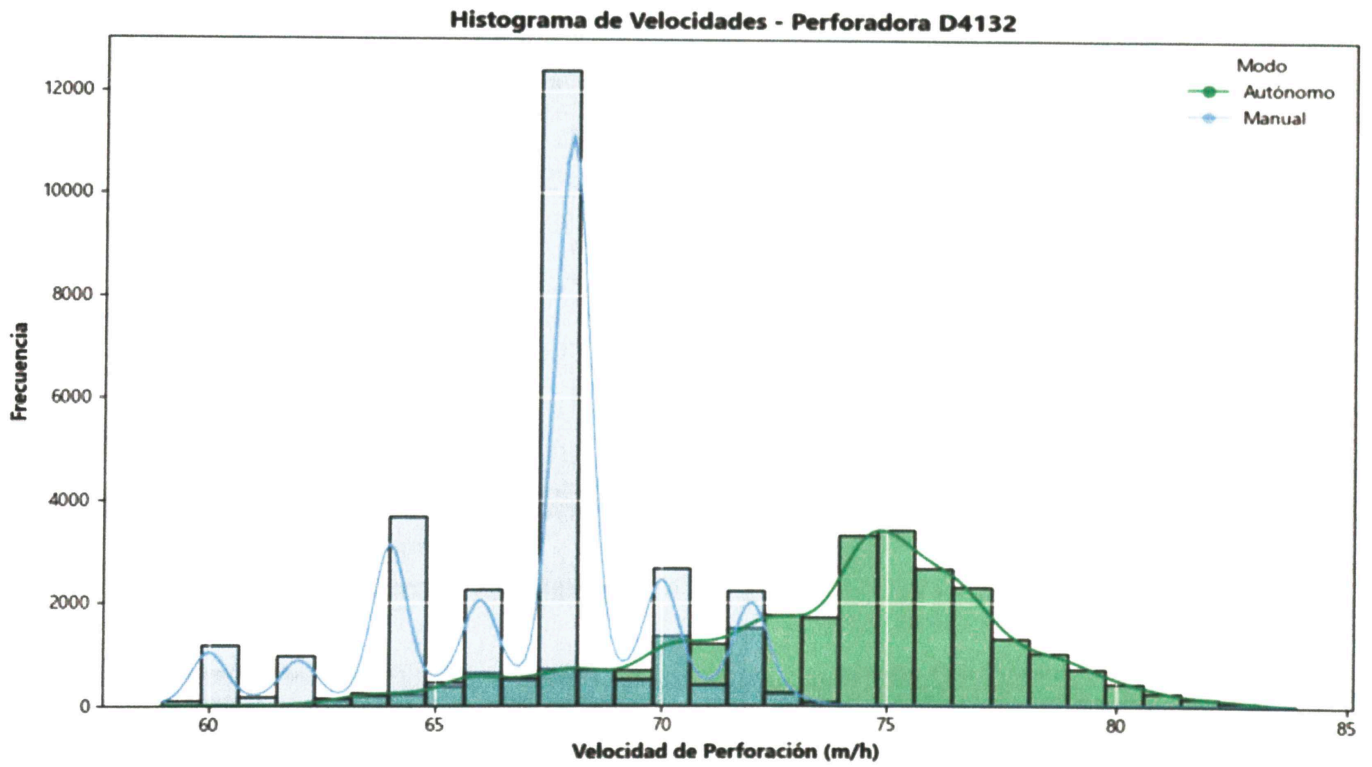


Ilustración 34 Histograma de velocidad de perforación – D4132

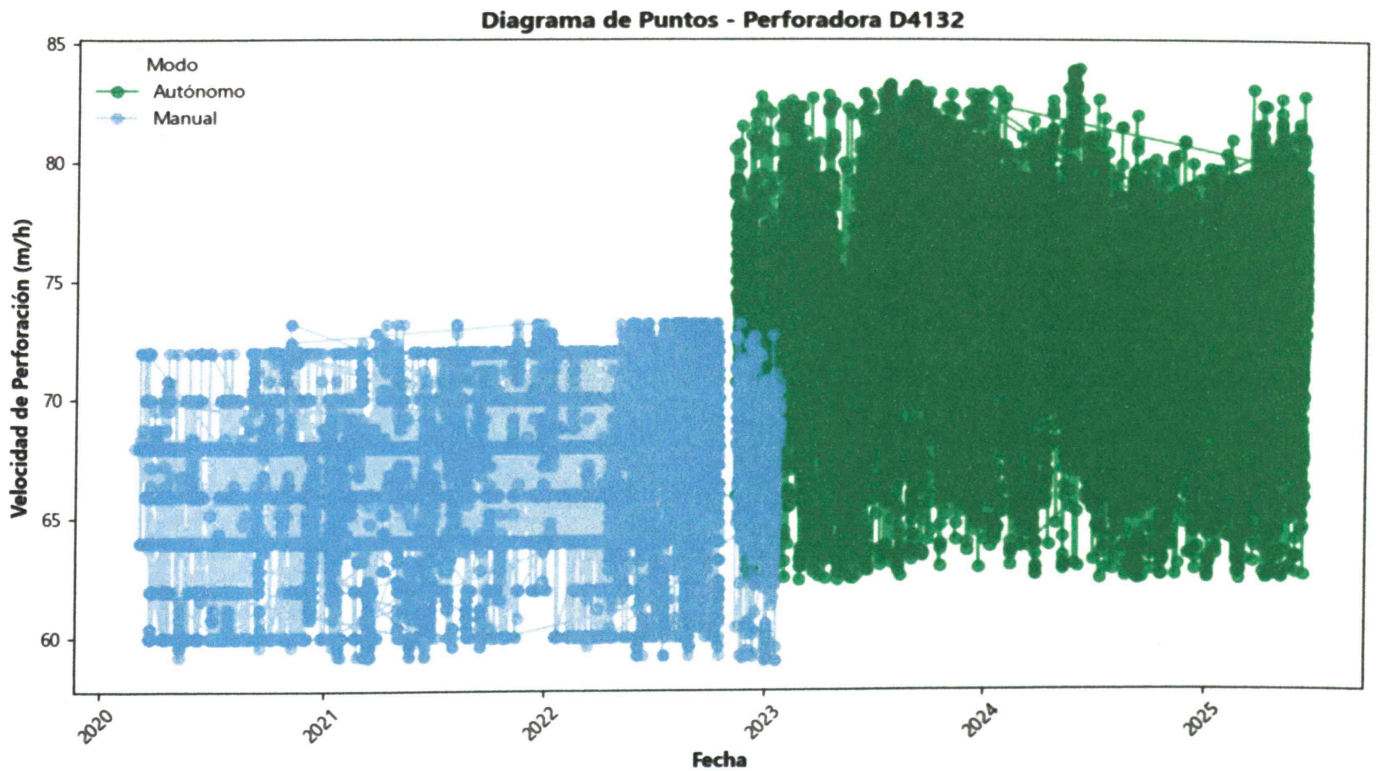


Ilustración 35 Diagrama de puntos de velocidad de perforación – D4132

## Anexo 4: Disponibilidad – Data depurada

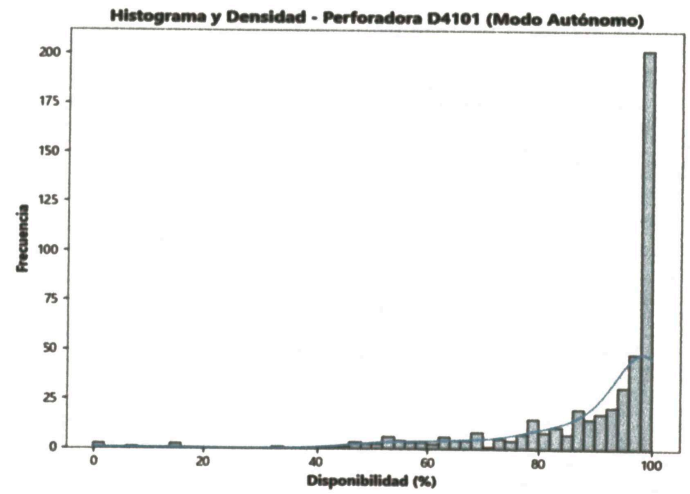
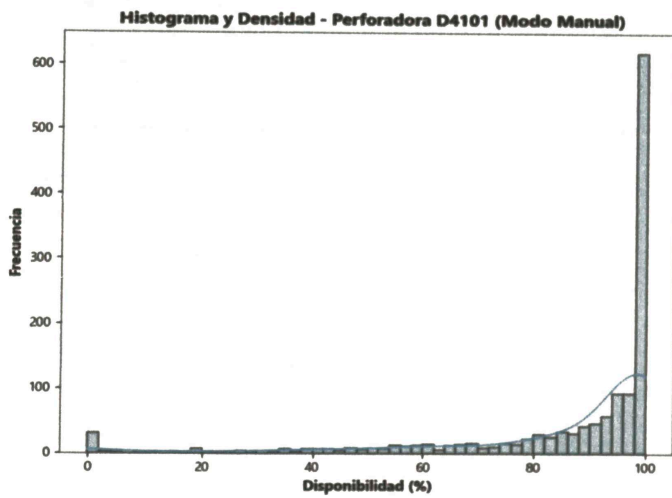


Ilustración 36 Histograma de disponibilidad – D4101

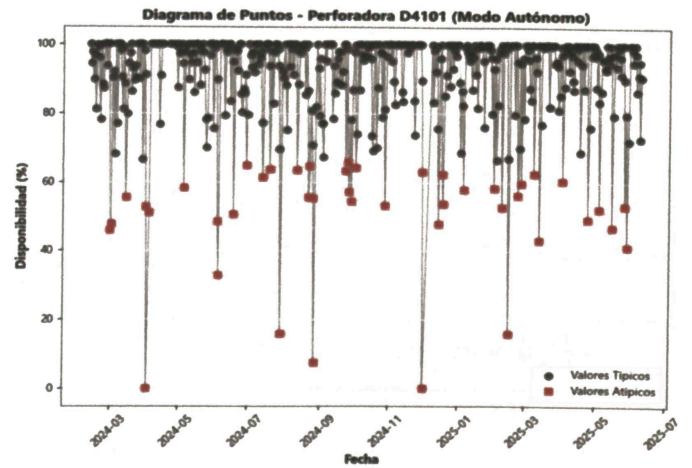
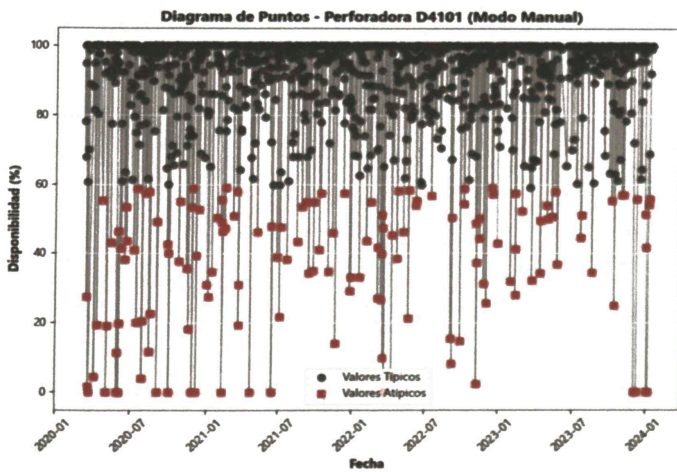


Ilustración 37 Diagrama de puntos de la disponibilidad – 4101

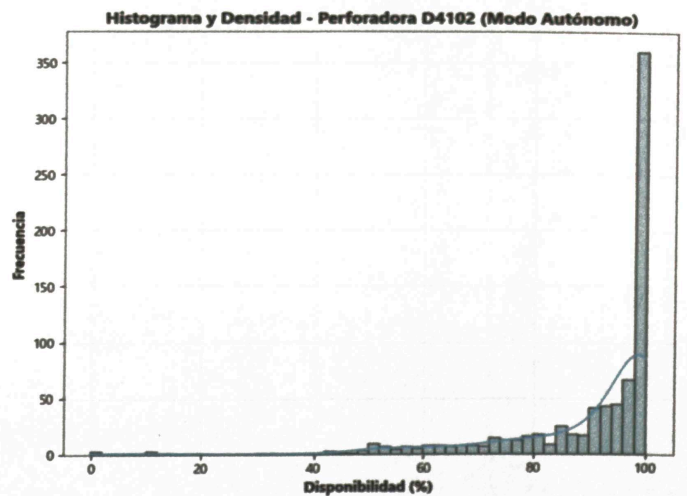
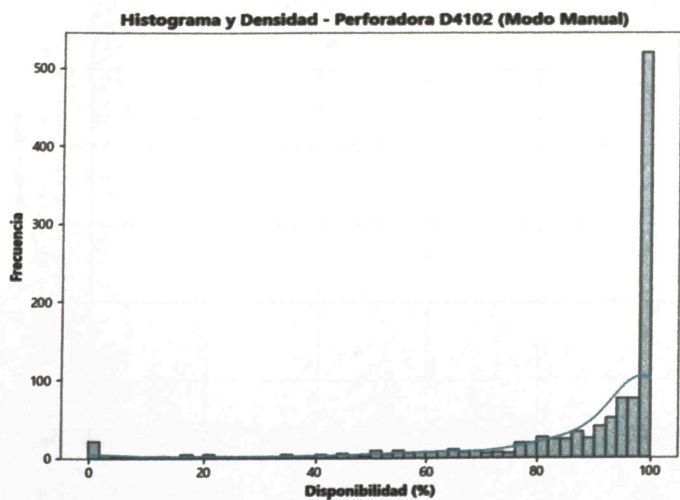


Ilustración 38 Histograma de disponibilidad – D4102

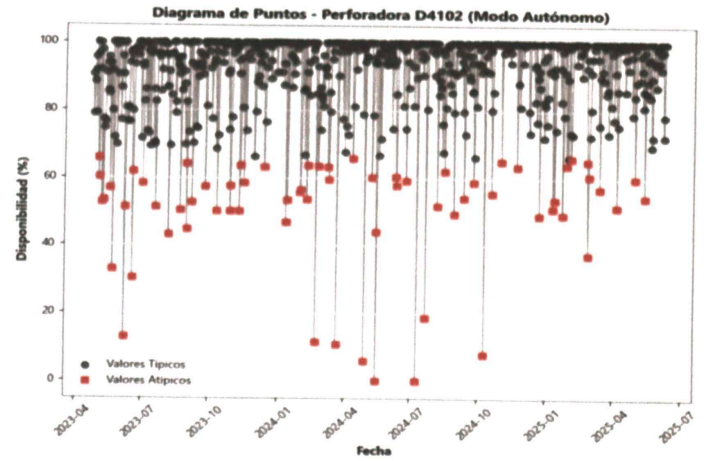
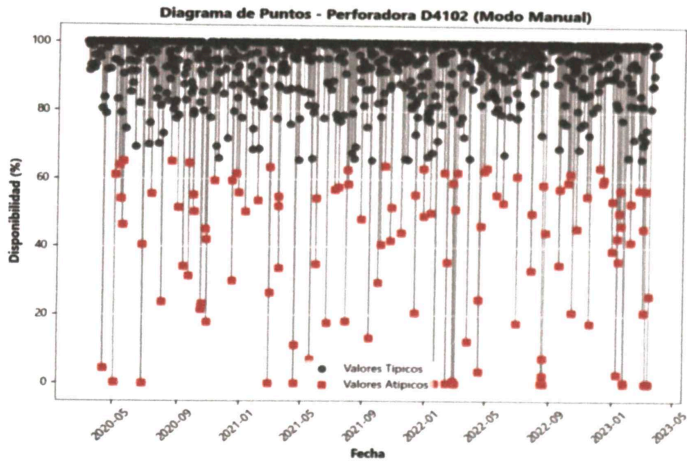


Ilustración 39 Diagrama de puntos de la disponibilidad – D4102

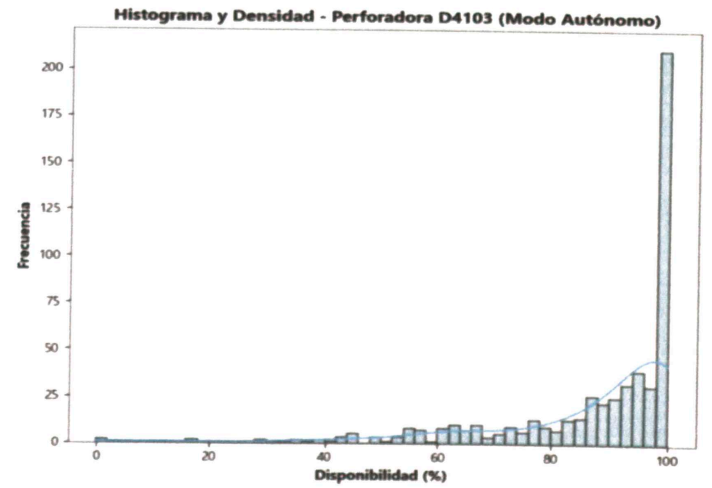
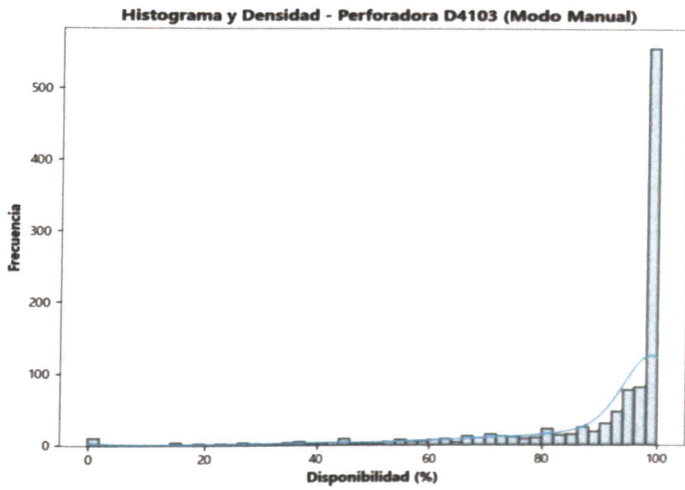


Ilustración 40 Histograma de disponibilidad – D4103

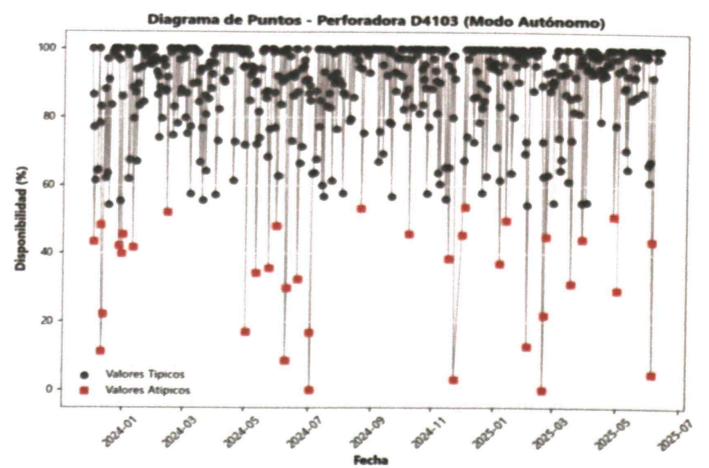
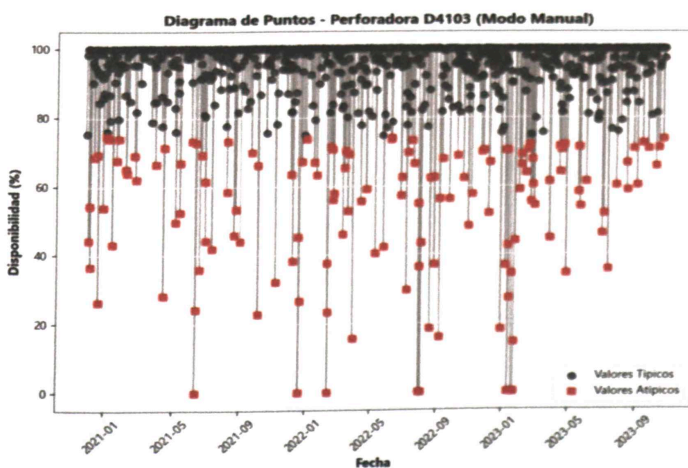
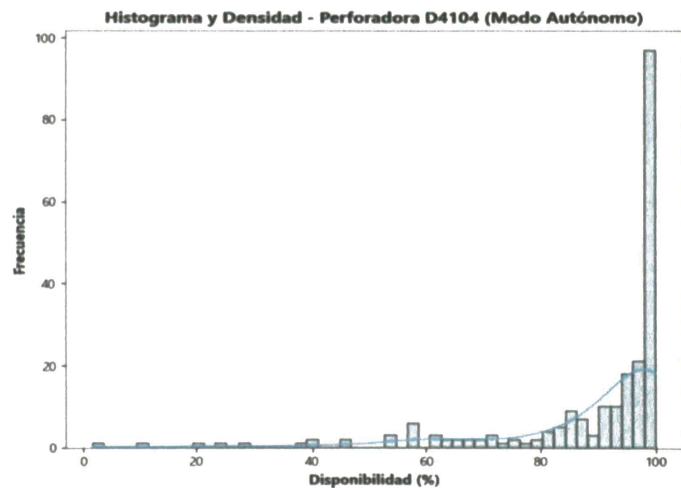
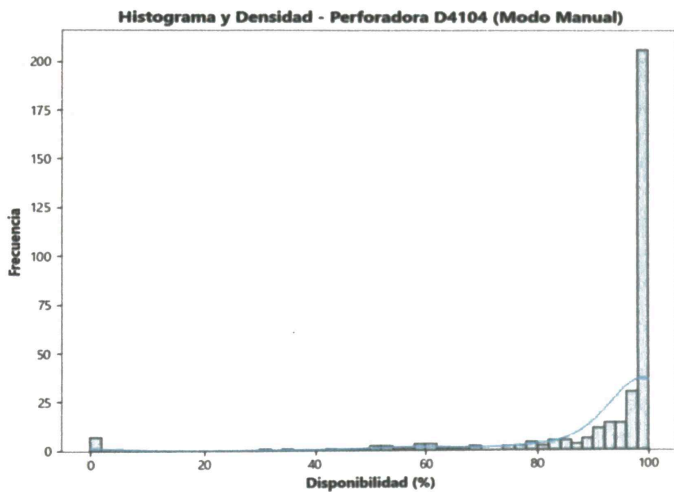
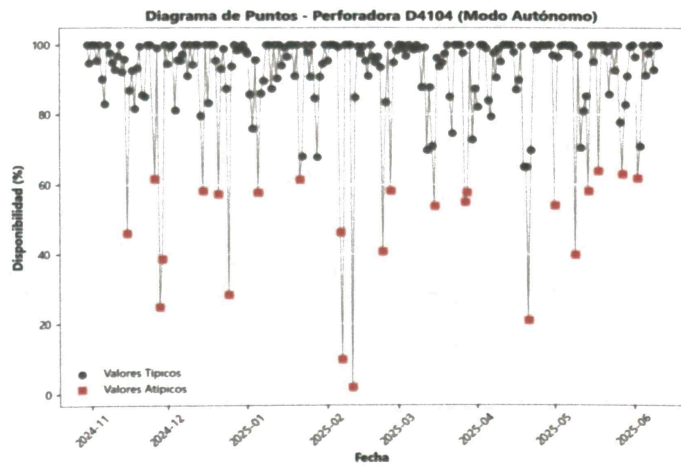
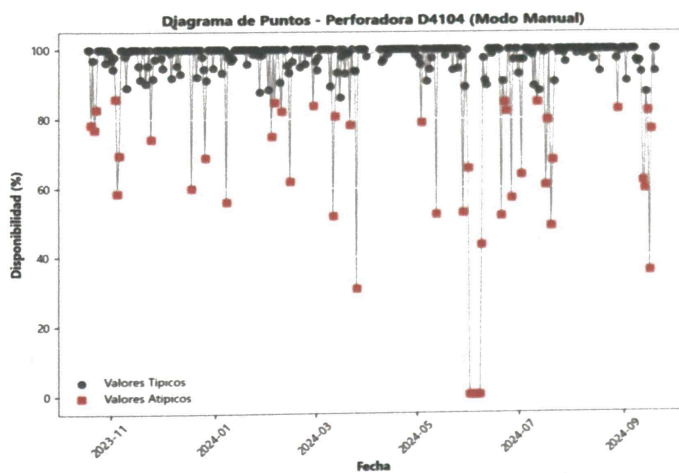


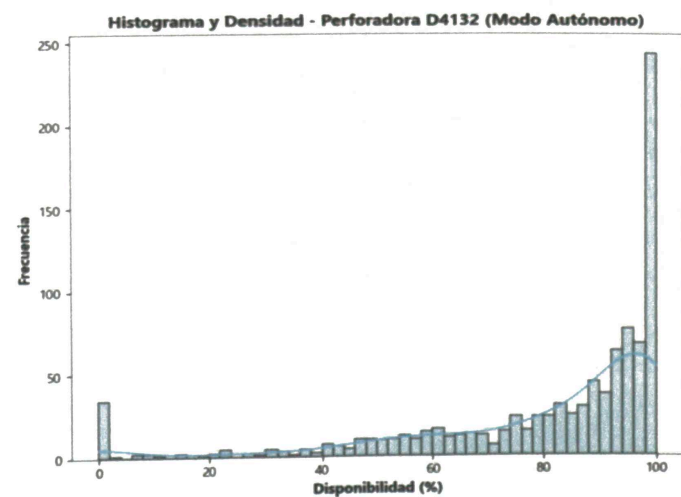
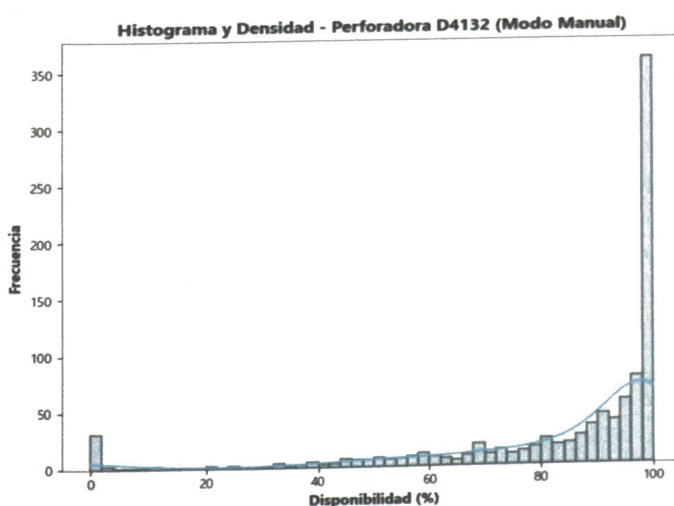
Ilustración 41 Diagrama de puntos de la disponibilidad – D4103



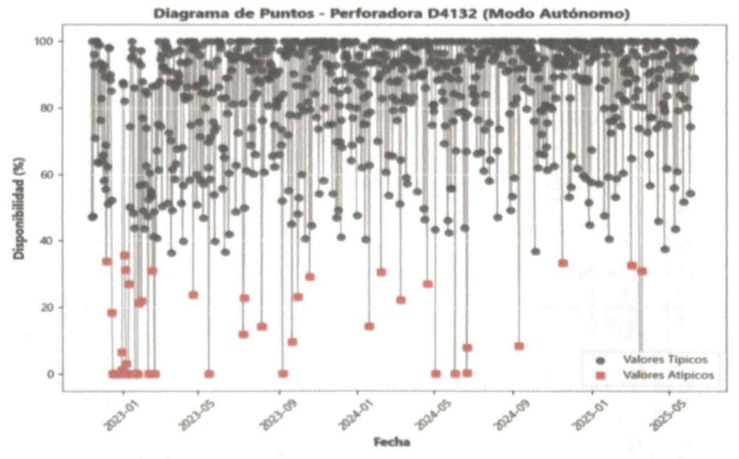
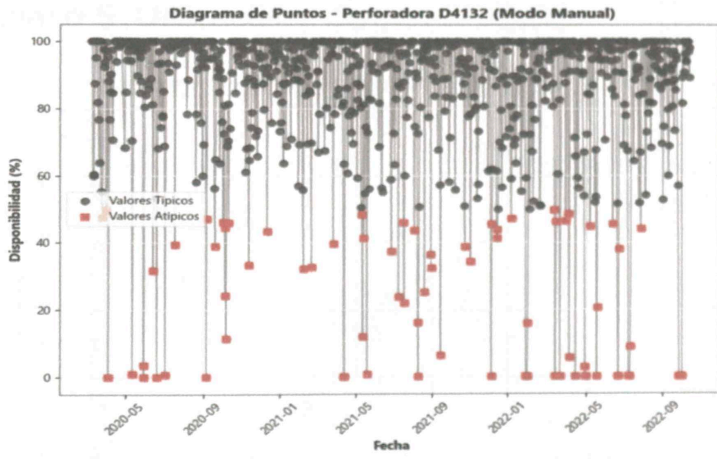
*Ilustración 42 Histograma de disponibilidad – D4104*



*Ilustración 43 Diagrama de puntos de la disponibilidad – D4104*



*Ilustración 44 Histograma de disponibilidad – D4132*



**Ilustración 45 Diagrama de puntos de la disponibilidad – D4132**

Anexo 5: Utilización – Data depurada

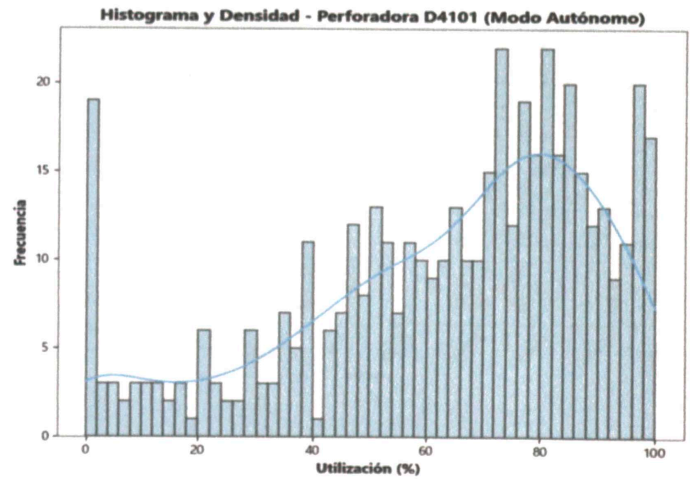
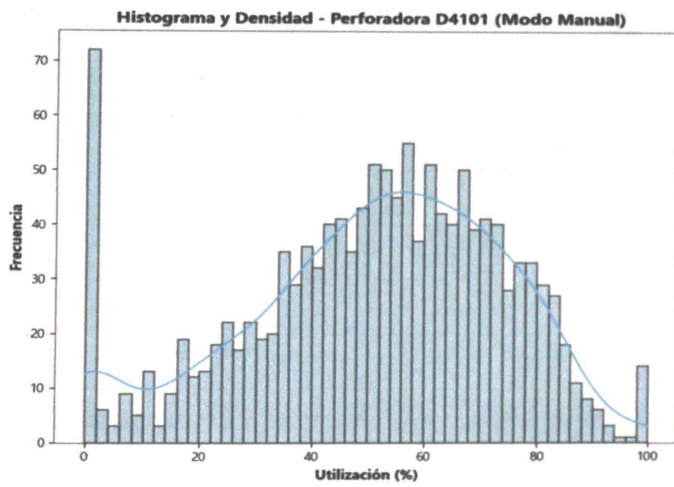


Ilustración 46 Histograma de utilización – D4101

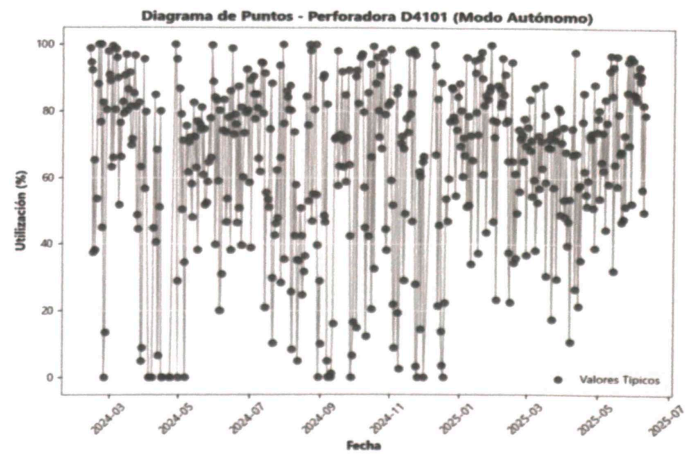
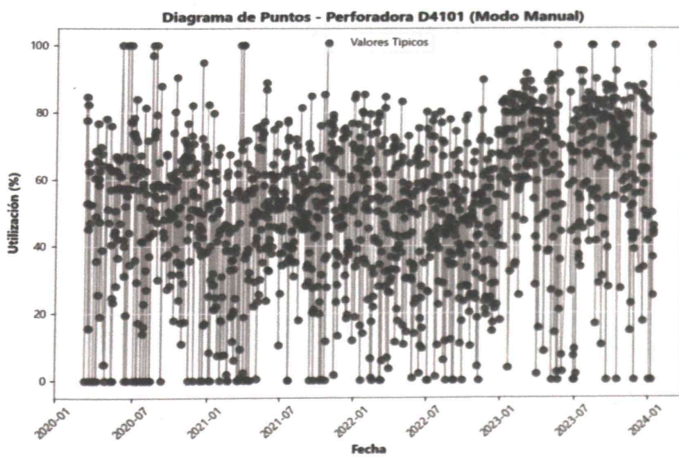


Ilustración 47 Diagrama de puntos utilización – D4101

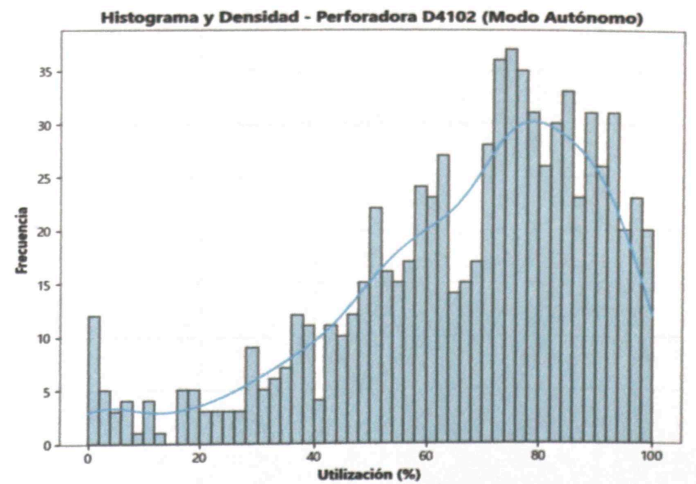
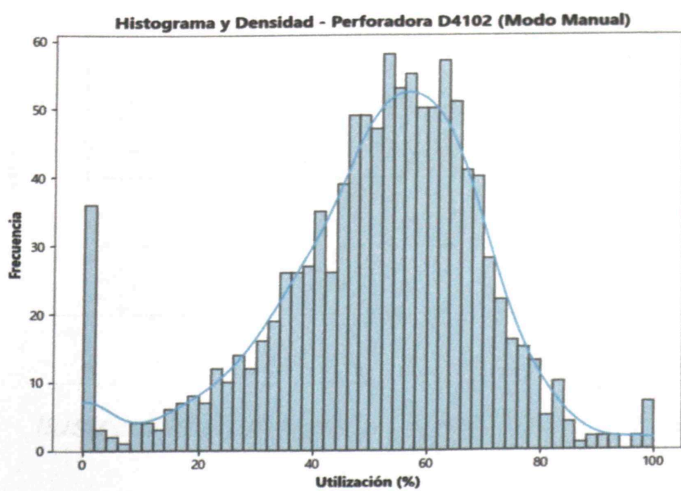


Ilustración 48 Histograma de utilización – D4102

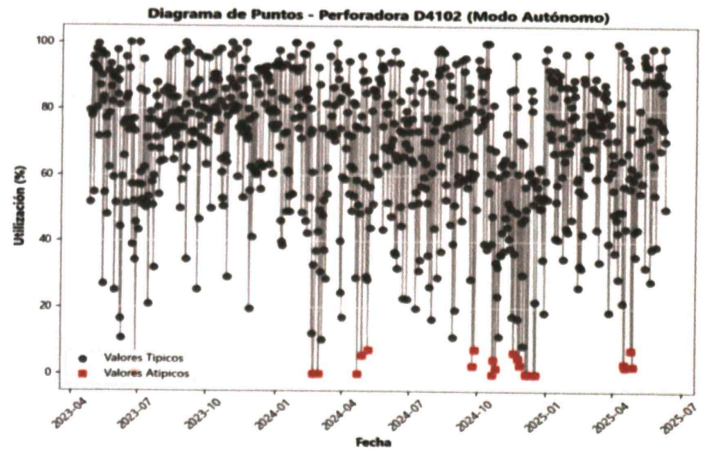
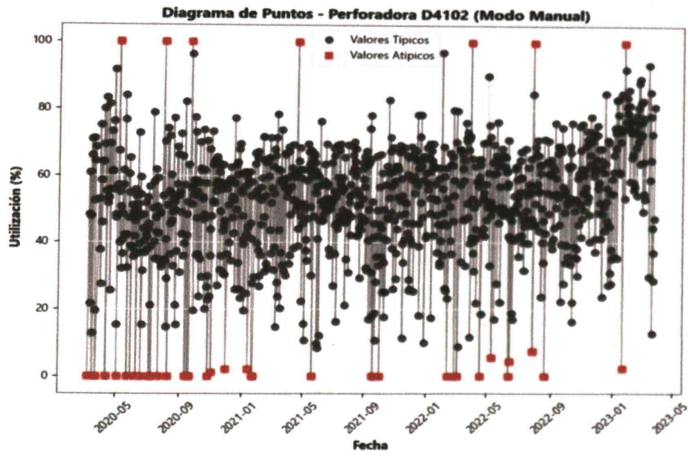


Ilustración 49 Diagrama de puntos utilización – D4102

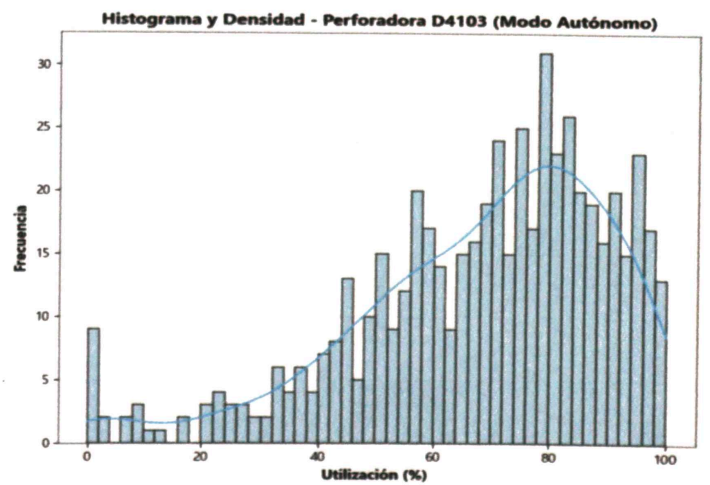
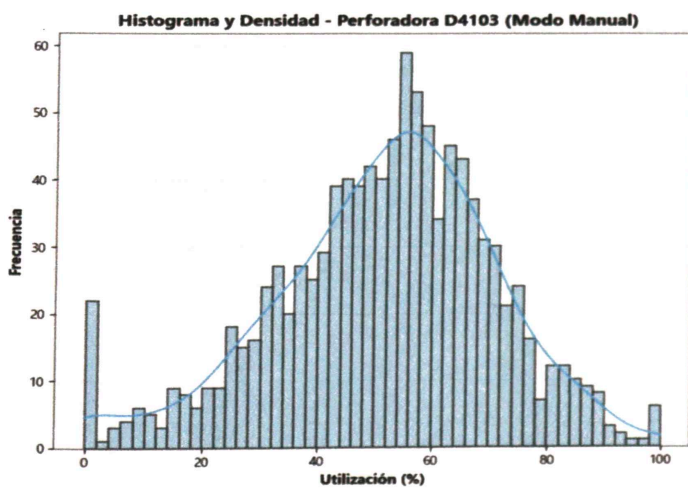


Ilustración 50 Histograma de utilización – D4103

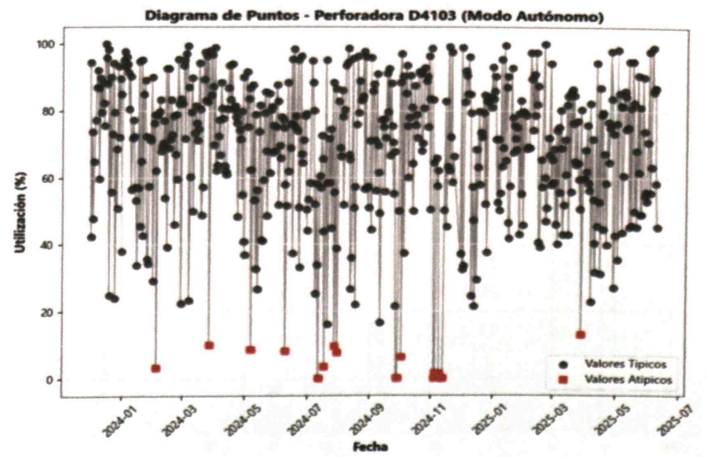
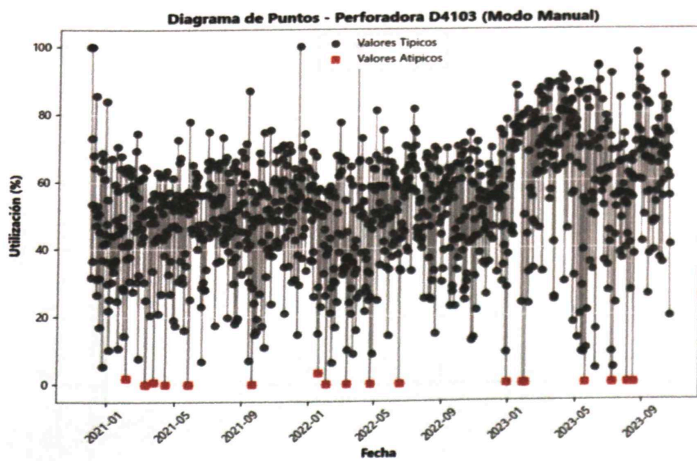


Ilustración 51 Diagrama de puntos utilización – D4103

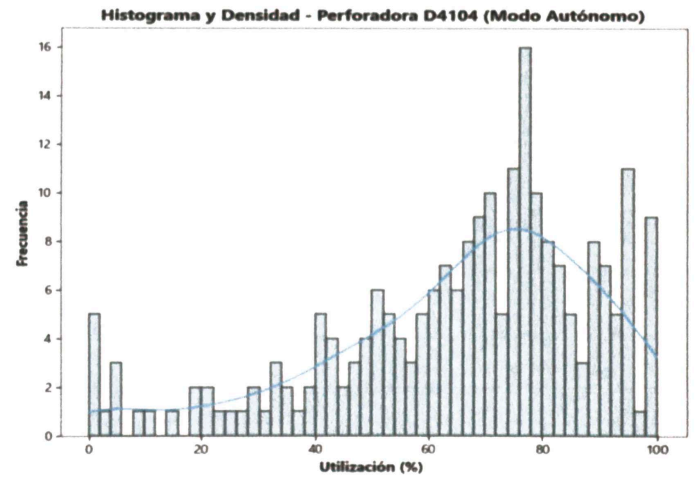
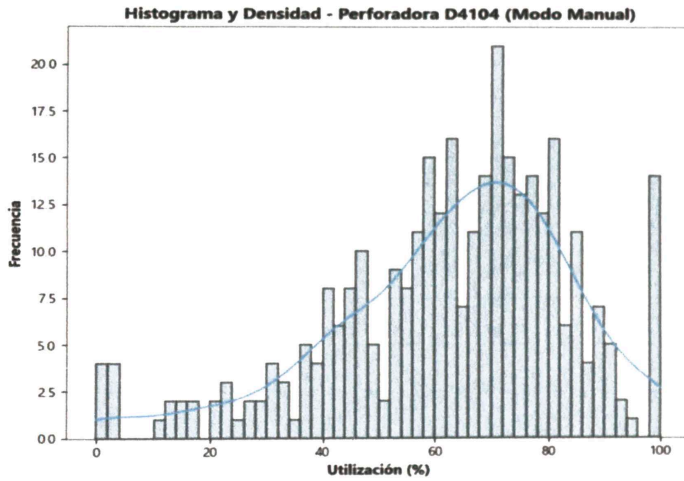


Ilustración 52 Histograma de utilización – D4104

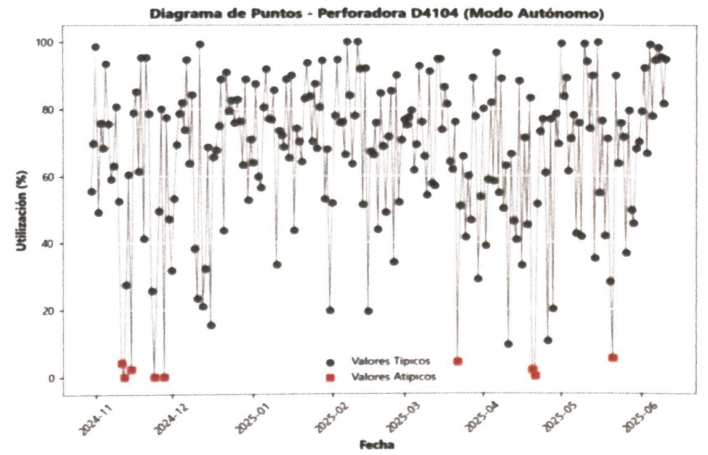
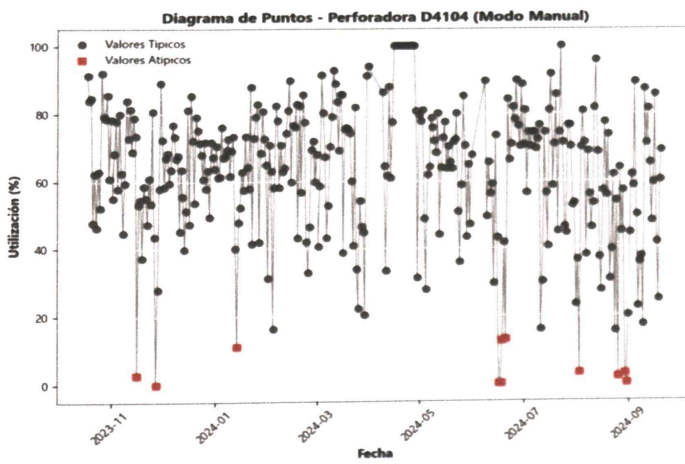


Ilustración 53 Diagrama de puntos utilización – D4104

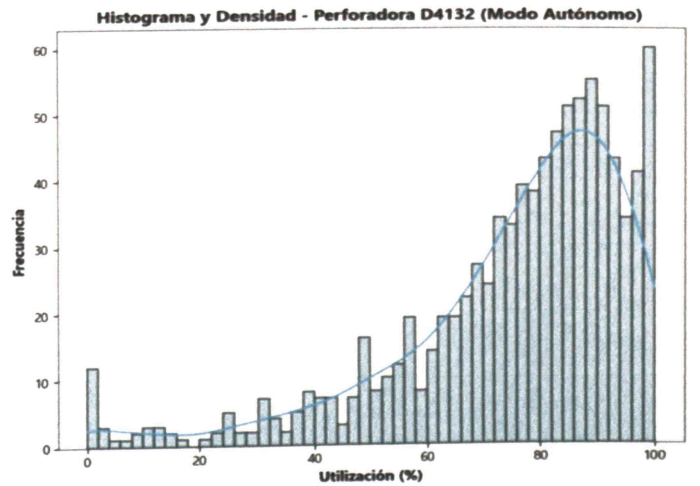
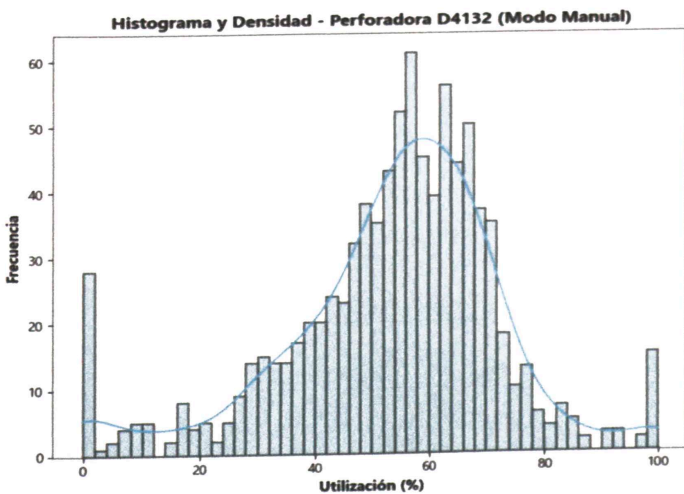


Ilustración 54 Histograma de utilización – D4132

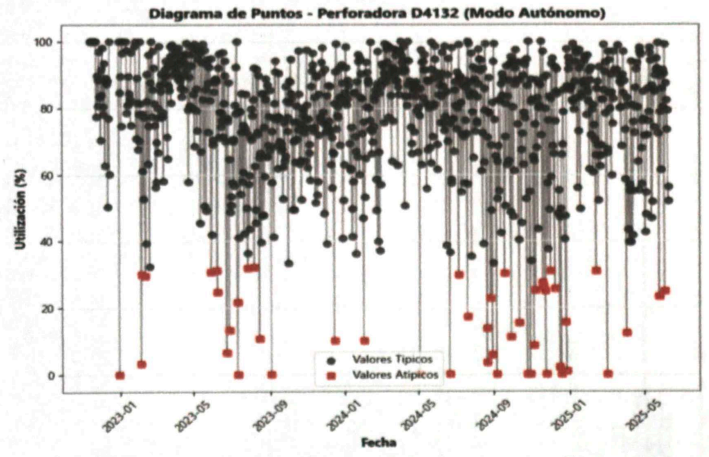
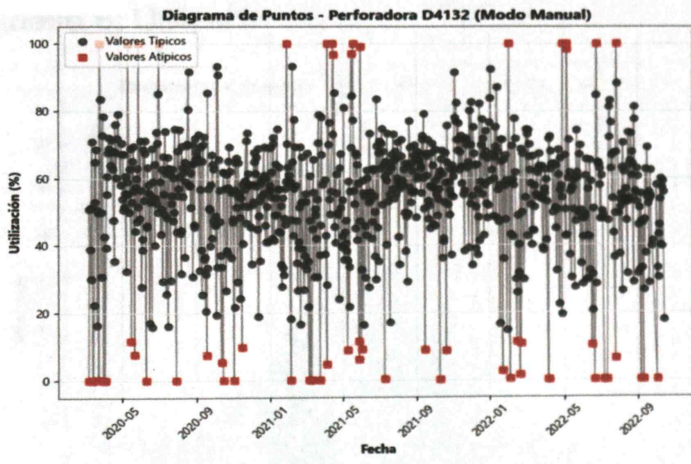
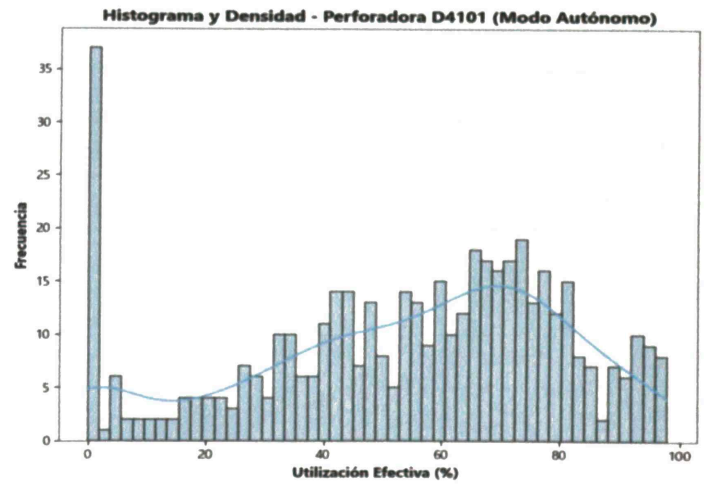
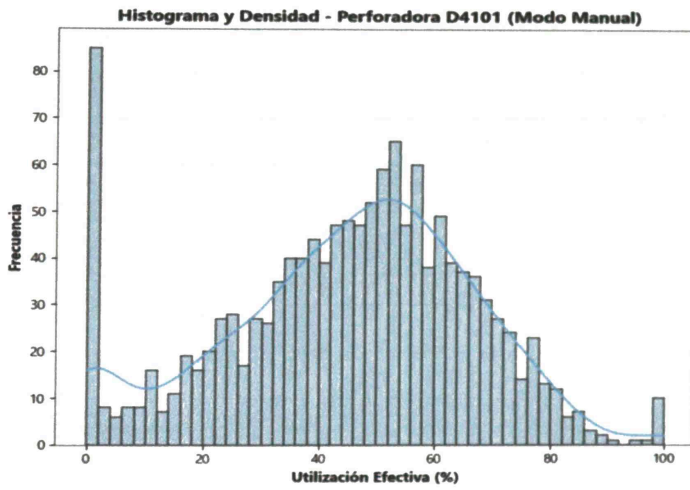
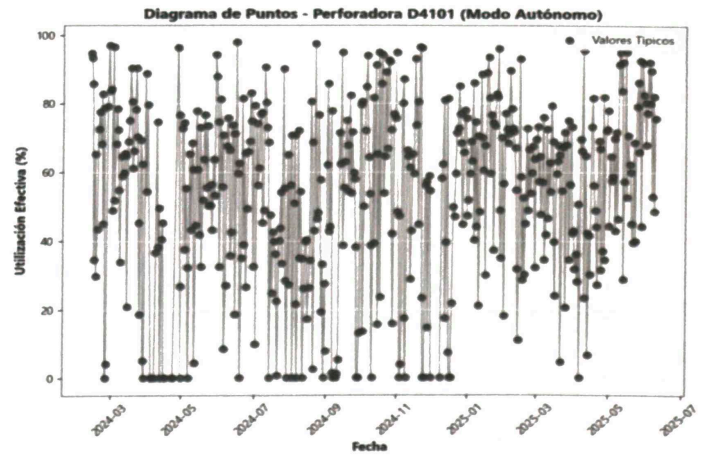
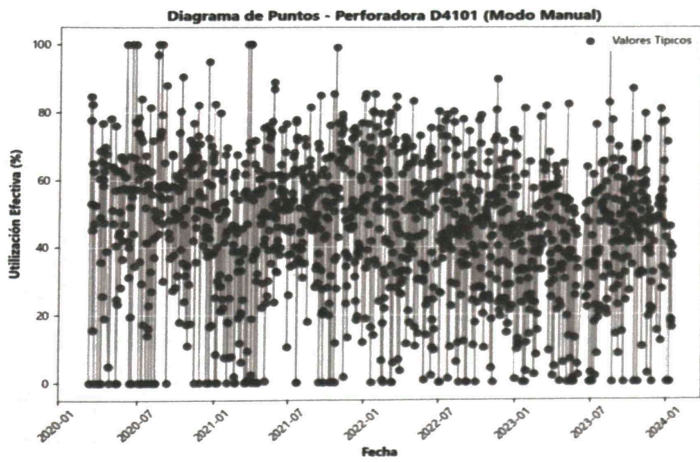


Ilustración 55 Diagrama de puntos utilización – D4132

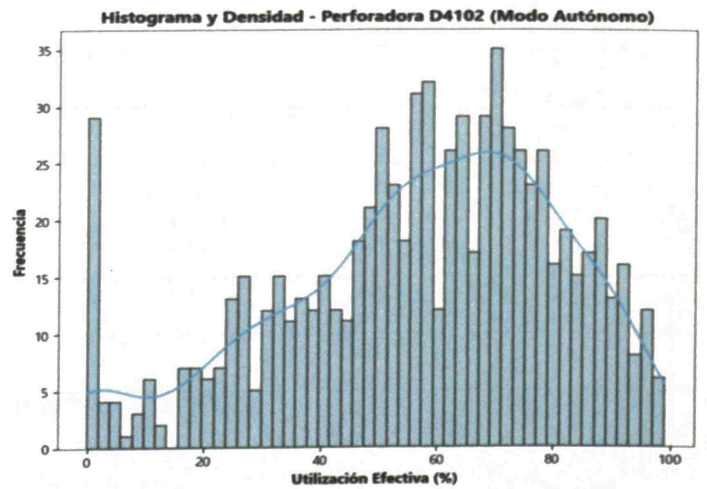
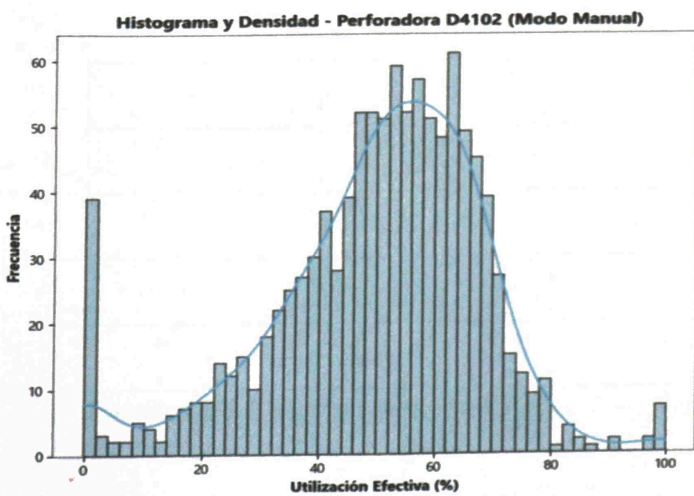
## Anexo 6: Utilización efectiva – Data depurada



*Ilustración 56 Histograma de utilización efectiva – D4101*



*Ilustración 57 Diagrama de puntos utilización efectiva – D4101*



*Ilustración 58 Histograma de utilización efectiva – D4102*

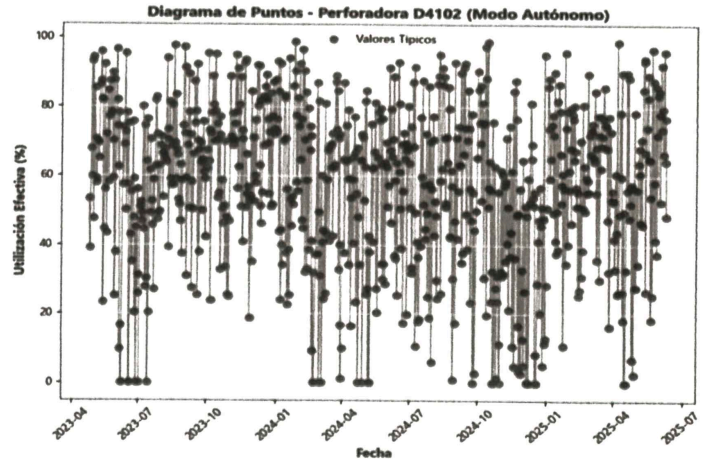
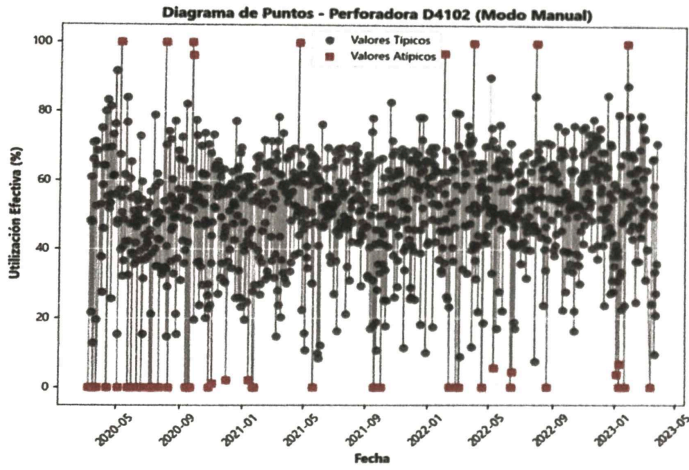


Ilustración 59 Diagrama de puntos utilización efectiva – D4102

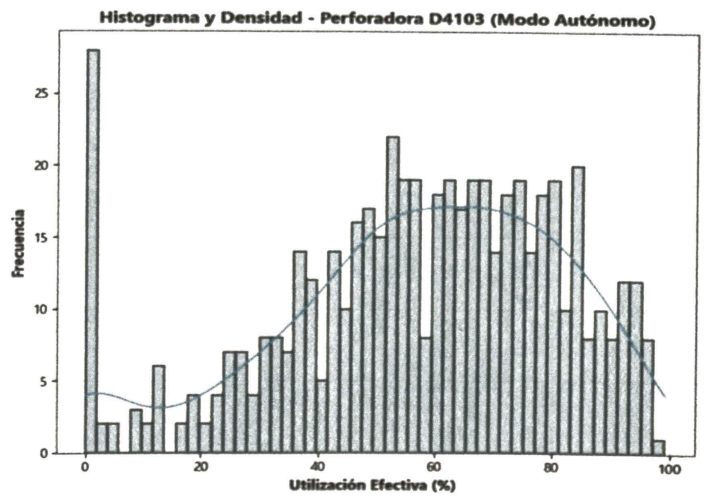
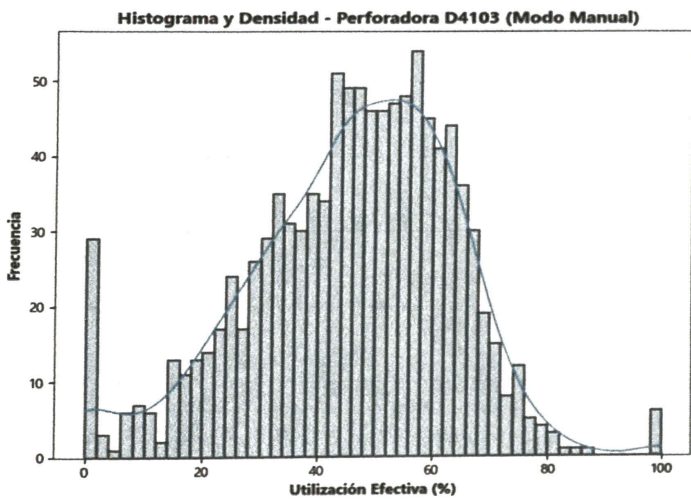


Ilustración 60 Histograma de utilización efectiva – D4103

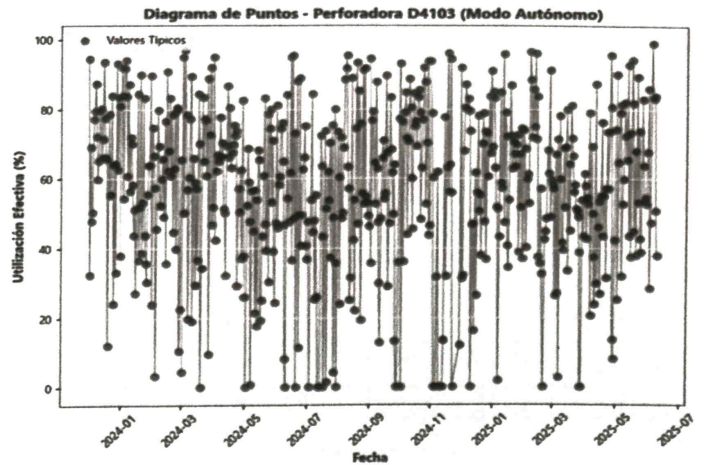
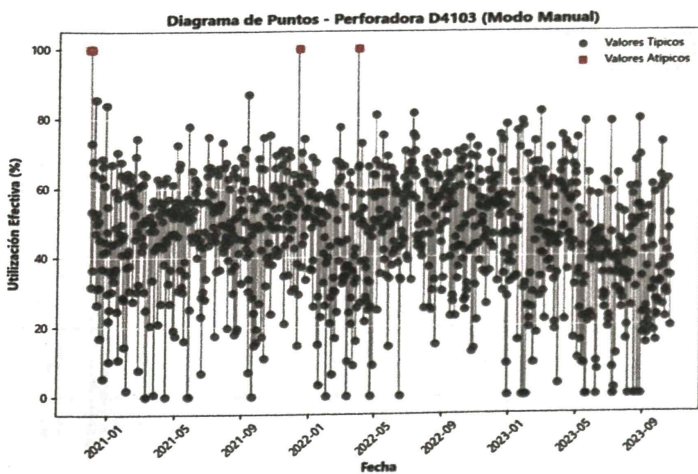
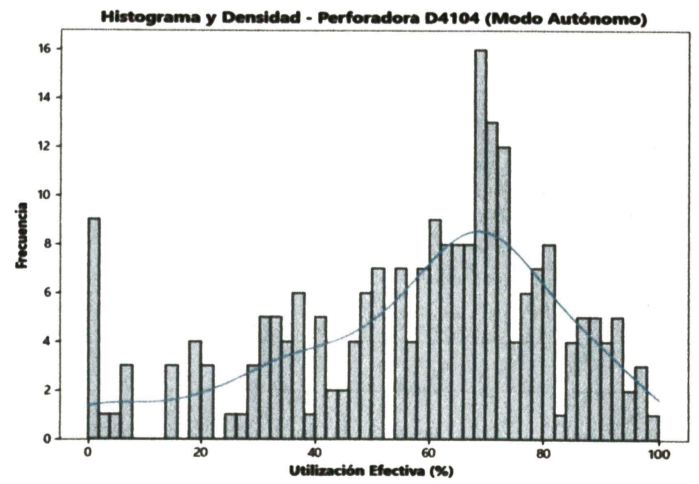
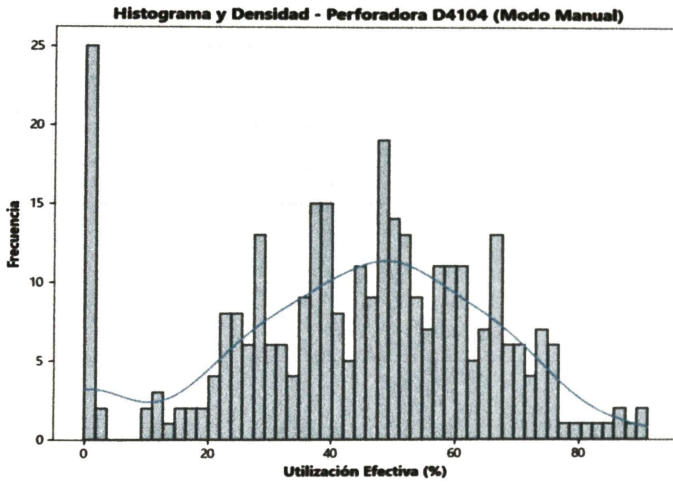
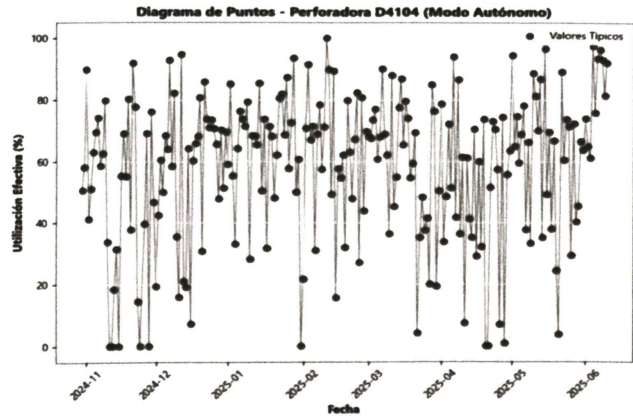
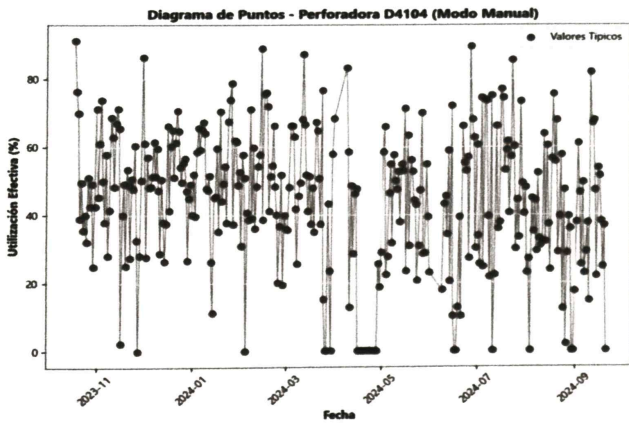


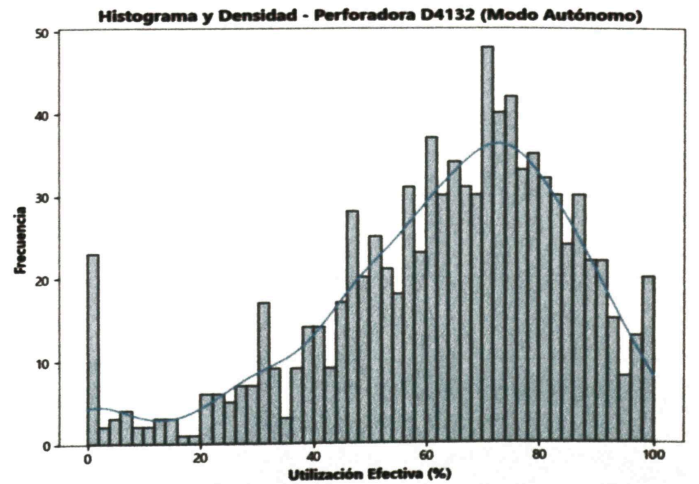
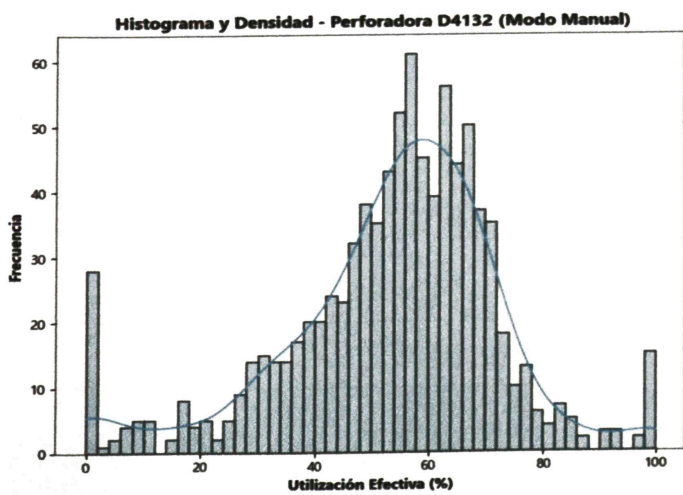
Ilustración 61 Diagrama de puntos utilización efectiva – D4103



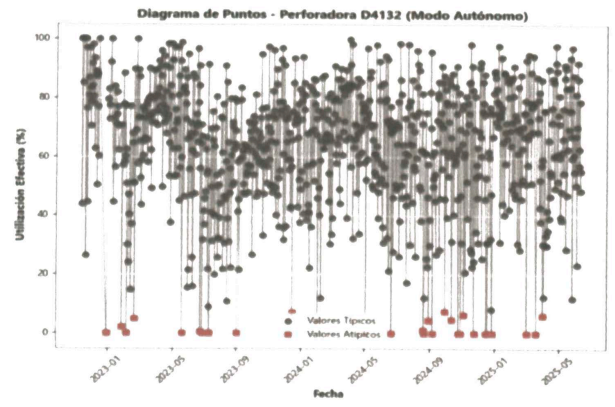
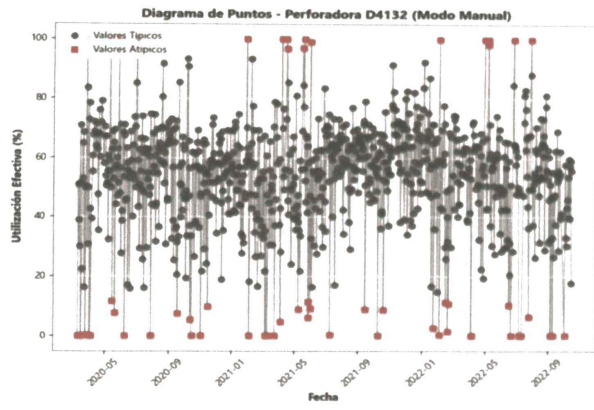
*Ilustración 62 Histograma de utilización efectiva – D4104*



*Ilustración 63 Diagrama de puntos utilización efectiva – D4104*



*Ilustración 64 Histograma de utilización efectiva – D4132*



**Ilustración 65 Diagrama de puntos utilización efectiva – D4132**