

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**EVALUACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD EN TALADROS DE
PRODUCCIÓN Y SU IMPACTO EN EL DIG RATE DE LAS
PALAS EN UNA MINA DEL SUR DEL PAÍS - 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Dennyz Beatriz Arucutipa Mamani

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ
2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

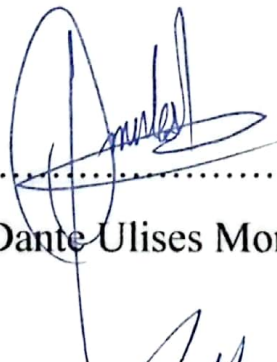
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

EVALUACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD EN TALADROS DE PRODUCCIÓN Y SU IMPACTO EN EL DIG RATE DE LAS PALAS EN UNA MINA DEL SUR DEL PAÍS - 2025

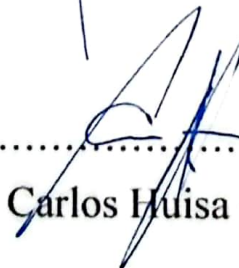
Tesis sustentada y aprobada el 22 de octubre del 2025, estando
el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE



.....
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

SECRETARIO



.....
Dr. Carlos Huisa Ccori

VOCAL



.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Carlos Huisa Ccori en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°_9622-2025-FAIN/UNJBG de la tesis titulada:

“EVALUACION DEL CONTROL DE CALIDAD EN TALADROS DE PRODUCCION Y SU IMPACTO EN EL DIG RATE DE LAS PALAS EN UNA MINA DEL SUR DEL PAIS -- 2025”
Presentado por el Bachiller Denny Beatriz Arucutipa Mamani (2029-101001), Para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual** __Turnitin__ cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es** __10__ % Por lo que,

CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional.

Tacna 01 de julio del 2025

FIRMA ASESOR

Dr. Carlos Huisa Ccori DNI. 00417032



Huella digital

FIRMA TESISTA

Bach. Denny Beatriz Arucutipa Mamani DNI. 71215874



Huella digital

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, Paulina Mamani, cuyo apoyo incondicional, sacrificio y ejemplo de perseverancia han sido fundamentales en la culminación de esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al ex jefe y supervisores del área de perforación, disparos y servicios auxiliares de la unidad minera de estudio, quienes me apoyaron desinteresadamente durante mi periodo como becaria.

Asimismo, a mi asesor de tesis, el Dr. Carlos Huisa Ccori, por su guía, paciencia y valiosos aportes que enriquecieron este trabajo en cada etapa.

Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a mi mentora, a todas las personas que me brindaron su apoyo a lo largo de este proceso y a mis docentes, por compartir sus conocimientos durante nuestro paso en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes del problema	3
1.2. Descripción del problema	4
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. <i>Problema general</i>	5
1.3.2. <i>Problemas específicos</i>	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	6
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	6
1.5. Justificación e importancia de la investigación	7
1.6. Limitaciones.....	8
1.7. Viabilidad del estudio	9
1.8. Formulación de hipótesis	10
1.8.1. <i>Hipótesis general</i>	10

1.8.2. Hipótesis específicas	10
1.9. Variables	10
CAPÍTULO II	13
MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes del estudio	13
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Aspectos generales de la mina.....	18
2.2.1.1. Ubicación.....	18
2.2.1.2. Accesibilidad	20
2.2.1.3. Características de la mina de estudio.....	20
2.2.1.4. Operación de minado de la mina del presente estudio.....	21
2.2.1.4.1. Perforación.....	21
2.2.1.4.2. Voladura.....	28
2.2.1.4.3. Carguío.....	47
2.2.1.4.4. Acarreo.....	48
2.2.2. Dig Rate de las Palas.....	49
2.2.3. Desviación de taladros	51
2.3. Definición de términos.....	53
CAPÍTULO III.....	60
MARCO METODOLÓGICO.....	60
3.1. Planteamiento metodológico.....	60
3.1.1. Tipo de estudio.....	60
3.1.2. Nivel de investigación	61

3.1.3. <i>Diseño de la investigación</i>	61
3.2. Población y muestra de estudio	61
3.4. Técnicas de recolección de datos	62
3.5. Técnicas para el procesamiento de datos	63
3.5.1. <i>Tabulación de información</i>	64
3.5.2. <i>Tratamiento y análisis estadístico de datos</i>	64
CAPÍTULO IV	66
RESULTADOS	66
4.1. Presentación y análisis de resultados	66
4.1.1. <i>Comparativa de taladros perforados con coordenadas planeadas por diseño vs coordenadas reales de taladros perforados</i> 66	
4.1.1.1. Cálculo de cantidad de taladros que sobrepasan el límite de desviación.	68
4.1.2. <i>Comparativa de explosivos usados en la unidad de estudio</i>	74
4.1.2.1. Diseño de taladros para cada proyecto.....	74
4.1.3. Comparativa de resultados obtenidos post voladura.....	86
4.1.3.1. Comparativa de fragmentación obtenida en P80 por tipo de explosivo de cada proyecto	86
4.1.3.2. Comparativa del Dig Rate obtenido en cada proyecto.....	88
4.1.3.3. Velocidad de excavación vs Fragmentación P80	91
4.1.4. Análisis de costos.....	93
4.1.4.1. Costo por cucharón de pala.....	96
CAPÍTULO V	99

DISCUSIÓN	99
5.1. Discusión de resultados	99
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES.....	104
CAPÍTULO VI	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	108
ANEXO 01: Matriz de consistencia	109
ANEXO 02: Matriz de operacionalización de variables.....	110
ANEXO 03: Malla de perforación del proyecto 3655-920.....	111
ANEXO 05: Malla de perforación del proyecto 3655-926.....	113
ANEXO 06: Malla de perforación del proyecto 3655-927.....	114
ANEXO 07: Malla de perforación del proyecto 3655-928.....	115
ANEXO 08: Malla de perforación del proyecto 3655-929.....	116
ANEXO 09: Resultado fragmentación proyecto 3655-928 y 3655-926.....	117
ANEXO 10: Formato de Reporte P80	118
ANEXO 11: Formato de Reporte Dig Rate	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables de estudio	12
Tabla 2 Accesibilidad a la mina de estudio.....	20
Tabla 3 Características principales del tajo.....	21
Tabla 4 Características principales de las perforadoras usadas en el tajo.....	22
Tabla 5 Parámetros de perforación por tipo de roca	22
Tabla 6 Estimación de la calidad de la roca JSF	23
Tabla 7 RQD vs Factor de corrección de la resistencia de los contactos	24
Tabla 8 Parámetros de perforación por tipo de roca	37
Tabla 9 Distancia crítica por diámetro de perforación.....	46
Tabla 10 Palas operativas en mina	47
Tabla 11 Volquetes operativos en mina	49
Tabla 12 Proyectos a evaluarse en el presente trabajo	62
Tabla 13 Tabla resumen de los proyectos a considerarse en el presente estudio...	67
Tabla 14 Tabla resumen de taladros desviados	74
Tabla 15 Tabla comparativo Dig Rate vs fragmentación P80	91
Tabla 16 Tabla Tonelaje y Tiempo por cucharón	92
Tabla 17 Comparación de costos por tipo de explosivo.....	93
Tabla 18 Ahorro por tipo de explosivo	94
Tabla 19 Tabla comparativo de costos	96
Tabla 20 Ahorro total por proyecto.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la mina de estudio	19
Figura 2 Comparación de indicadores de calidad para hallar el factor K	25
Figura 3 Diseño de malla triangular equilátera mina de estudio.....	25
Figura 4 Diagrama de Factor SD.....	27
Figura 5 Escenarios de cálculo de factor SD.....	28
Figura 6 Componentes del sistema eléctrico.....	31
Figura 7 Conexión del detonador electrónico	32
Figura 8 Estructura interna de un detonador electrónico	32
Figura 9 Cable de conexión.....	33
Figura 10 Logger	34
Figura 11 Blaster – Iniciador de voladura.....	35
Figura 12 Cargado de explosivos en proyectos de voladura de la unidad minera de estudio	37
Figura 13 Booster de 2 lb.	40
Figura 14 Fanel.....	41
Figura 15 I-KON Xtreme	42
Figura 16 Pala 6 realizando carguío en mina.	48
Figura 17 Desviación de taladros – Proyecto 3655-920	68
Figura 18 Desviación de taladros – Proyecto 3655-921	69
Figura 19 Desviación de taladros – Proyecto 3655-926	70
Figura 20 Desviación de taladros – Proyecto 3655-927	71
Figura 21 Desviación de taladros – Proyecto 3655-928	72
Figura 22 Desviación de taladros – Proyecto 3655-929	73
Figura 23 Plano de carguío – Proyecto 3655-920	74
Figura 24 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-920	75
Figura 25 Diseño de taladros – Proyecto 3655-920	75

Figura 26 Plano de carguío – Proyecto 3655-921	76
Figura 27 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-921	76
Figura 28 Diseño de taladros – Proyecto 3655-921	77
Figura 29 Plano de carguío – Proyecto 3655-926	78
Figura 30 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-926	78
Figura 31 Diseño de taladros – Proyecto 3655-926	79
Figura 32 Plano de carguío – Proyecto 3655-927	80
Figura 33 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-927-929	80
Figura 34 Diseño de taladros – Proyecto 3655-927	81
Figura 35 Plano de carguío – Proyecto 3655-928	82
Figura 36 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-928	82
Figura 37 Diseño de taladros – Proyecto 3655-928	83
Figura 38 Plano de carguío – Proyecto 3655-929	84
Figura 39 Diseño de salida de la malla de voladura Proyecto 3655-927-929	84
Figura 40 Diseño de taladros – Proyecto 3655-929	85
Figura 41 Comparativa fragmentación P80 Proyecto 3655-921 vs 3655-927-929	86
Figura 42 Comparativa fragmentación P80 Proyecto 3655-926 vs 3655-926 vs 3655-928	87
Figura 43 Comparativa del Dig Rate Proyecto 3655-921 vs 3655-927-929	89
Figura 44 Comparativa del Dig Rate Proyecto 3655-920 vs 3655-926 vs 3655-928	90
Figura 45 Comparativa entre Dig Rate vs Fragmentación P80	91
Figura 46 Comparación de costos por tipo de explosivo	94
Figura 47 Ahorro económico por proyecto	95
Figura 48 Ahorro por N° de cucharones de cada proyecto	97

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad evaluar el impacto del Control de calidad en taladros de producción sobre el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país. Durante el estudio, se analizaron seis proyectos operativos, identificando que un pequeño porcentaje de taladros presentaba desviaciones superiores al límite tolerable de 3.00 metros. Estas desviaciones afectan directamente la distribución de la energía explosiva, requiriéndose ajustes en campo en la carga de taladros para no perjudicar la fragmentación del macizo rocoso.

Se evaluó el rendimiento comparativo entre el uso de emulsión gasificada y emulsión energética. Los resultados mostraron que la emulsión energética, pese a tener un costo unitario ligeramente mayor, generó mejores resultados en fragmentación, reduciendo el P80 en un 18,00 % e incrementando el Dig Rate en un 23,13 % en los proyectos donde fue aplicada.

En el análisis económico, se comprobó que el uso de emulsión energética y el control de calidad en la voladura permitieron un ahorro total de \$ 1,958.24 en costo por tonelada de explosivo, además de una reducción adicional de \$ 608.35 al considerar el costo por cucharón de pala, en base al total de pases registrados.

Palabras clave: Control de calidad, Dig Rate, Desviación de taladros, Tipo de Explosivo y Fragmentación.

ABSTRACT

This research aimed to assess the impact of quality control in production drillholes on the Dig Rate of shovels in a mining operation located in the southern region of the country. Six operational projects were analyzed, revealing that a small percentage of drillholes exhibited deviations greater than the allowable limit of 3.00 meters. These deviations directly affect the distribution of explosive energy, requiring on-site adjustments to the explosive load in order to avoid negatively impacting rock fragmentation.

A comparative performance evaluation was conducted between gasified emulsion and energetic emulsion. Results indicated that energetic emulsion, despite having a slightly higher unit cost, delivered superior fragmentation performance—reducing the P80 by 18,00 % and increasing the Dig Rate by 23,13 % in the projects where it was applied.

In the economic analysis, it was confirmed that the use of energetic emulsion combined with effective quality control during blasting led to a total savings of USD 1,958.24 in explosive cost per ton, along with an additional reduction of USD 608.35 when considering the cost per shovel bucket, based on the total number of loading passes recorded.

Keywords: Quality control, Dig Rate, Drillhole deviation, Type of explosive, Fragmentation.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia operativa en minería a cielo abierto depende en gran medida de la calidad del proceso de perforación y voladura. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto del control de calidad en los taladros de producción sobre el Dig Rate de las palas en una mina del sur del país, considerando como variables independientes la desviación de las perforaciones y el tipo de explosivo utilizado. El Dig Rate, medido en toneladas por hora, es una variable dependiente clave que refleja el rendimiento del carguío. Además, se incluyen variables económicas como el costo de los explosivos, el costo por metro perforado y el factor de carga, los cuales influyen directamente en la rentabilidad de la operación. El estudio busca identificar cómo una adecuada calidad en la perforación puede optimizar la fragmentación del material, reducir costos operativos y mejorar la productividad general de la mina.

La presente tesis se desarrolla en 6 capítulos:

En el Capítulo I, se aprecia el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y las hipótesis.

El Capítulo II, muestra los antecedentes, el marco teórico y las bases teóricas que orientan el desarrollo de la investigación.

El Capítulo III, comprende el aspecto metodológico, tipo de investigación, nivel y diseño, asimismo, se pone especial atención en la recolección y tratamiento de datos pertenecientes a la muestra.

En el capítulo IV, se evalúan los resultados con el propósito de comprobar la hipótesis general y específicas enunciadas.

En el capítulo V, se expone la discusión de los resultados del presente trabajo, mediante un análisis detallado del valor tecnológico que presenta la investigación, así mismo, se desarrolla el análisis de costos asociados al presente trabajo.

Como parte final del trabajo, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema

En la minería a cielo abierto, la eficiencia de las operaciones de carga está estrechamente relacionada con la calidad del proceso de perforación y voladura. En particular, el Dig Rate, medido en toneladas por hora, se ha convertido en un indicador clave para evaluar el rendimiento de las palas, ya que refleja la facilidad con la que estas pueden extraer el material fragmentado. Una perforación mal ejecutada, con desviaciones significativas causadas por diversas razones, así como una inadecuada selección de explosivos, puede generar una fragmentación deficiente. Esto afecta directamente la eficiencia del carguío, alargando los tiempos de operación, aumentando el desgaste del equipo y elevando los costos.

En este contexto, diversos estudios han señalado que un adecuado control de calidad en los taladros de producción permite obtener una fragmentación más homogénea, reduciendo la resistencia del material al ser extraído por las palas. Sin embargo, en muchas operaciones mineras aún no se da la debida importancia a este proceso, enfocándose únicamente en cumplir los volúmenes de producción sin considerar los efectos posteriores en la cadena operativa.

Además, el impacto económico de una mala calidad en la perforación se refleja no solo en la reducción del Dig Rate, sino también en el aumento de costos operativos como el uso excesivo de explosivos, un mayor factor de carga y un incremento del costo por metro perforado. Ante esta problemática, surge la necesidad de evaluar de forma integral cómo las desviaciones en la perforación y el tipo de explosivo influyen en la productividad del carguío, y cómo una mejora en estos aspectos puede generar beneficios tanto técnicos como económicos para la operación minera.

1.2. Descripción del problema

La eficiencia en el proceso de carguío es un factor determinante para alcanzar los objetivos de producción y rentabilidad. Sin embargo, se ha identificado una baja en el Dig Rate de las palas, indicador que mide la cantidad de material cargado por hora en toneladas, lo cual impacta negativamente en la continuidad operativa y en los costos asociados. Esta baja eficiencia suele estar relacionada con deficiencias en el control de calidad durante la perforación de taladros de producción.

Las desviaciones en la ubicación de los taladros por fallas generan una distribución inadecuada de los explosivos, lo que conlleva a una fragmentación deficiente del material. Asimismo, una elección incorrecta del tipo de explosivo, sin considerar el diseño de la carga para la voladura, puede acentuar estos

problemas. Estas deficiencias no solo afectan el Dig Rate, sino que también incrementan los costos operativos, como el costo por metro perforado, el consumo de explosivos y el factor de carga.

Actualmente, muchas operaciones mineras no cuentan con un sistema integral que permita evaluar y controlar estas variables de forma efectiva. Por ello, es fundamental analizar cómo la calidad en la perforación incide directamente en el rendimiento de las palas y en los costos operativos. Esta investigación tiene como propósito analizar y comprender la relación entre las variables involucradas en el proceso de perforación y su impacto en el Dig Rate de las palas, con el objetivo de proponer estrategias técnicas que permitan optimizar la productividad operativa y reducir costos innecesarios asociados a una mala fragmentación y a deficiencias en el control de calidad.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo afecta el control de calidad en taladros de producción en el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país?

1.3.2. Problemas específicos

- a) ¿Cómo afectan las desviaciones de taladros de producción en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país?

- b) ¿Cómo afecta el tipo de explosivo cargado en los taladros de producción en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país?
- c) ¿Cómo afecta la fragmentación obtenida en el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del Control de calidad en taladros de producción sobre el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país.

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Identificar las desviaciones de taladros de producción que sobrepasan el límite y el impacto que genera en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.
- b) Emplear el tipo de explosivo adecuado para la carga en los taladros de producción y el impacto que genera en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.
- c) Analizar el Dig Rate de las palas de acuerdo a la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

El control de calidad en los taladros de producción es una actividad crítica en la minería, ya que determina la eficiencia y efectividad del proceso extractivo. La presente investigación se centra en evaluar cómo factores como la desviación de los taladros, la selección del tipo de explosivo y la fragmentación del material afectan el "Dig Rate" (tasa de excavación) de las palas. Este análisis resulta esencial para mejorar la productividad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Las desviaciones en la orientación de los taladros pueden generar una distribución no uniforme de explosivos, lo que conduce a una fragmentación deficiente del material. Según (Jimeno, López Jimeno, & Ayala, 1995), "las irregularidades en el diseño y ejecución de los taladros impactan directamente la calidad de la fragmentación y aumentan los costos operativos". Una fragmentación inadecuada genera un mayor esfuerzo de excavación, desgaste de las palas y tiempo perdido en las operaciones, afectando el desempeño general.

La elección del explosivo adecuado es un factor crucial en el control de calidad. Explosivos mal seleccionados o mal aplicados pueden producir resultados inconsistentes en la fragmentación, generando materiales demasiado grandes o demasiado finos. (McKenzie, 2012) explica que "el tipo y la cantidad de explosivo deben ser determinados con base en las características geológicas para optimizar los resultados del proceso de voladura". Esto también tiene implicaciones

económicas, ya que el uso ineficiente de explosivos puede incrementar significativamente los costos.

Una fragmentación óptima del material es un indicador de un buen control de calidad. La fragmentación irregular influye negativamente en la eficiencia de las palas, disminuyendo su "Dig Rate" y aumentando los costos de transporte y procesamiento. (Peng, 2017) "un control adecuado de la fragmentación mejora no solo la eficiencia operativa, sino también reduce los costos energéticos y ambientales".

El desarrollo de esta investigación permite establecer parámetros claros y estrategias de mejora continua en el control de calidad, con el objetivo de optimizar la fragmentación, reducir las desviaciones y seleccionar los tipos de explosivos más adecuados. Esto contribuye a mejorar la productividad y reducir los costos operativos.

1.6. Limitaciones

Restricción en la obtención de información

El acceso a información técnica relacionada con las voladuras se vio limitado, ya que dichas actividades son ejecutadas por una empresa contratista externa. Esta empresa gestiona los datos relacionados con los tipos y cantidades de explosivos utilizados, secuencias de disparo y demás parámetros operativos. A

pesar de las gestiones realizadas, se obtuvo información parcial, centrando el análisis en los datos disponibles.

Volumen de información disponible

La recopilación de datos se realizó de manera progresiva, siendo obtenida en lapsos semanales o mensuales. Esta forma de recolección exigió un tiempo prolongado para alcanzar una base de datos lo suficientemente representativa para realizar un análisis técnico adecuado. Asimismo, la falta de información completa sobre la etapa de voladura condicionó el enfoque del estudio hacia los aspectos operativos de perforación, donde se tuvo mayor acceso.

1.7. Viabilidad del estudio

A pesar de las restricciones identificadas, el estudio demuestra ser viable debido a que se cuenta con acceso suficiente a la información relacionada con el proceso de perforación, área en la cual el investigador desempeña sus funciones como becaria. Esta cercanía operativa permite una recolección directa y continua de datos relevantes para el análisis técnico, lo cual garantiza una base sólida para el desarrollo del trabajo.

Si bien el acceso a la información completa sobre la etapa de voladura ha sido limitado por tratarse de un proceso tercerizado, esta condición no impide que se puedan realizar evaluaciones generales del impacto de la perforación en los resultados obtenidos, así como análisis complementario basados en documentaciones disponibles.

1.8. Formulación de hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

Un control de calidad eficiente en taladros de producción mejorará el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país.

1.8.2. Hipótesis específicas

- a) Identificando las desviaciones de taladros de producción que sobrepasan el límite se mejorará la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.
- b) Empleando el tipo de explosivo adecuado para la carga de los taladros de producción se podrá mejorar la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.
- c) A menor tamaño de fragmentación del material volado se obtendrá un mayor Dig Rate en palas en una Mina del sur del país.

1.9. Variables

- **Variable 1:** Control de calidad

Definición conceptual:

Gutiérrez (2014) Define el control de calidad como el conjunto de técnicas y procedimientos utilizados por la gestión organizacional para asegurar la obtención de un producto con la calidad deseada.

- **Variable 2:** Dig Rate de las Palas

Definición conceptual:

Rojas y Miranda (2020) El Dig Rate es la velocidad de excavación de los equipos de carguío que se obtiene a partir de información del sistema *Dispatch* y que considera las variables: tonelaje total cargado y tiempo efectivo de carguío.

Ambas variables poseen las siguientes características:

- Tipo: Numérica continua, dado que se expresa mediante valores reales que pueden incluir decimales.
- Naturaleza: Cuantitativa, ya que representa una magnitud medible.
- Escala: De razón, porque se mide desde cero absolutos y permite establecer relaciones proporcionales.

1.10. Operacionalización de las variables

Tabla 1*Operacionalización de variables de estudio*

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
V. Independiente: Control de calidad en taladros de producción	Gutierrez (2014) El control de calidad es el conjunto de técnicas y procedimientos del que se sirve la dirección para la obtención de un producto de la calidad Deseada.	Precisión de los taladros	- Límite tolerable de desviación	- m.
		Fragmentación	- P80	Pulg.
			- Tipo de explosivo	-
V. Dependiente: Dig Rate de las Palas	Rojas y Miranda (2020) El dig rate es la velocidad de excavación de los equipos de carguío que se obtiene a partir de información del sistema Dispatch y que considera las variables: tonelaje total cargado y tiempo efectivo de carguío.	Tasa de excavación	- Velocidad de excavación	- T / h
			- Tiempo por cucharón cargado	- Seg.
			- Costo por cucharón cargado	- \$ / T

Podemos analizar mayor detalle en el **Anexo 02: Matriz de operacionalización de variables.**

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

La eficiencia en las operaciones mineras a cielo abierto está estrechamente vinculada a la calidad en la ejecución de las labores de perforación y voladura, ya que estas influyen directamente en la fragmentación del material y, por ende, en el rendimiento de los equipos de carguío como las palas. Diversos estudios han abordado esta temática, evidenciando la importancia de un control adecuado en estos procesos para optimizar la productividad minera.

Antecedentes internacionales

En el estudio realizado por Ghosh, P.K. (2016), titulado *Optimization of drill and blast parameters for improved productivity in opencast coal mines*, se analizó el impacto del diseño y control de calidad en la perforación sobre el rendimiento de carga en minas a cielo abierto de la India. El objetivo fue optimizar los parámetros de perforación y voladura para maximizar la productividad y minimizar costos operativos. Se evaluaron diferentes configuraciones de burden, espaciamiento y tipo de explosivo, considerando la fragmentación lograda y la

eficiencia en la carga con palas hidráulicas. Los resultados demostraron que un diseño de taladros controlado y adaptado a las condiciones geológicas permitió incrementar la eficiencia del proceso de carga hasta en un 18 %. La conclusión destaca que un control riguroso del diseño y ejecución de los taladros mejora significativamente el dig rate, reduciendo el consumo energético de las palas y los tiempos muertos durante la operación de acarreo.

Burt, C. y Banks, G. (2010), en su investigación *A review of rock fragmentation by blasting and its effect on shovel digging productivity*, abordaron la relación entre la calidad del control en perforación y voladura con el rendimiento de equipos de carga en minas a cielo abierto. Su objetivo fue analizar cómo la fragmentación del material influye en el tiempo de ciclo de excavación y la productividad en toneladas por hora. A través de un análisis estadístico de datos operacionales en minas australianas, encontraron que una fragmentación consistente y dentro del rango óptimo (P80 entre 200 y 400 mm) incrementó la tasa de carga hasta en un 25 %, además de reducir el desgaste en cuchillas y aumentar la vida útil de las palas. Concluyeron que una ejecución deficiente de los taladros impacta negativamente la fragmentación y, por ende, compromete el rendimiento del Dig Rate, recomendando monitoreo sistemático del diseño y ejecución de perforaciones.

Halatchev y Knights (2007), en su estudio Spatial variability of shovel dig performance, examinaron la influencia de factores geotécnicos y de diseño de taladros en la productividad de carga en una mina de cobre en Australia Occidental. El objetivo principal fue modelar la variabilidad espacial del rendimiento de las palas, considerando la calidad de voladura como una variable determinante. Mediante la aplicación de geoestadística, identificaron zonas con pobre fragmentación correlacionadas con bajo Dig Rate, lo cual permitió ajustar el diseño de perforación en futuras voladuras. Los resultados mostraron que la homogeneidad en la fragmentación del macizo rocoso mejora significativamente el ritmo de excavación, incluso sin cambiar el tipo de equipo. Concluyeron que el control de calidad en la perforación permite anticipar variaciones en la productividad y planificar mejor los recursos de acarreo, siendo una herramienta estratégica para mejorar el rendimiento general de la operación minera.

Antecedentes nacionales

En el estudio realizado por Calderón, Quispe y Vega (2019), titulado Influencia de la precisión de perforación en la eficiencia de carguío en minería a cielo abierto, se analizó cómo las desviaciones en la perforación afectan la eficiencia del proceso de carguío. El objetivo fue determinar el impacto de la precisión en la perforación sobre la fragmentación del material y el Dig Rate. Los resultados indicaron que una mayor precisión en la perforación mejora

significativamente la fragmentación del material, permitiendo un Dig Rate más alto. Específicamente, se observó una reducción del P80 en un 15 %, lo que se tradujo en un aumento del Dig Rate en un 12 %, optimizando así el rendimiento de las palas.

Por otro lado, González y Ríos (2020), en su investigación titulada Optimización de la fragmentación en voladuras, se propusieron identificar las causas técnicas que afectan negativamente la fragmentación y proponer mejoras en los parámetros de perforación y voladura. El estudio concluyó que un control de calidad deficiente en perforación puede generar sobre o sub-perforaciones, así como desviaciones en la orientación de los taladros. Al implementar mejoras en el alineamiento de los taladros y seleccionar adecuadamente los explosivos, se logró optimizar la fragmentación, reduciendo el tamaño de los bloques en un 20 % y mejorando la eficiencia del proceso de carga en un 10 %.

Asimismo, Ramírez (2018), en su trabajo titulado Evaluación del uso de emulsiones versus ANFO en tajos duros, tuvo como objetivo comparar la eficiencia en la fragmentación de rocas entre distintos tipos de explosivos en condiciones geológicas complejas. El estudio destacó que la elección del tipo de explosivo influye en la calidad del disparo. Se encontró que el uso de emulsiones resultó en una fragmentación más fina, con una reducción del P80 en un 18 % en comparación

con el ANFO, lo que impactó positivamente en el tiempo ciclo de las palas, reduciéndolo en un 8 %.

Antecedentes locales

Salinas y Ninahuanca (2022), en el trabajo Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura y su incidencia en el rendimiento de los equipos de carguío bajo el concepto *mine to mill*, en una mina a tajo abierto, investigaron en una mina del sur del Perú cómo las variables de voladura —como granulometría, factor de potencia y litología— afectan el dig rate de los camiones y palas bajo un enfoque Mine to Mill. Su objetivo fue cuantificar el impacto de estos factores en el rendimiento de carga en dos periodos (jul-dic 2020 y ene-jun 2021). Encontraron que al incrementar el factor de potencia de 0,51 a 0,57 kg/t, la granulometría mejoró en 0,04 pulgadas, lo cual elevó el dig rate en aproximadamente 1 142,66 t/h. Concluyeron que ajustar parámetros operacionales de perforación y voladura, en estrecha relación con la litología, puede incrementar significativamente la productividad en el área de carguío y acarreo. (Salinas Canal & Ninahuanca Chumbe, 2022)

La tesis Voladura con detonadores electrónicos en la mejora de la fragmentación de rocas, Unidad Minera Pucamarca, Compañía Minera Minsur S.A. 2020 (Vega Vargas, 2024) investigó la influencia del uso de detonadores electrónicos en la fragmentación del macizo y su repercusión en la productividad

de las palas en el sur del país. En un diseño pre-experimental, se aplicaron detonadores electrónicos en un tiro nivelado, evaluando el cambio en parámetros P80 y P100, vibraciones y producción de material. Los resultados mostraron mejoras del 10,98 % en P80, 4,73 % en P100, reducción de vibraciones en 47,54 % y aumento de la producción de material en 17,85 %. Se concluye que la tecnología electrónica permite una fragmentación más uniforme, reduciendo parámetros finos y mejorando el dig rate de las palas, proponiéndose su adopción como práctica estándar en voladuras de producción en la región sur peruana.

Los estudios evidencian la relevancia de un control de calidad riguroso en las etapas de perforación y voladura, así como la adecuada selección de explosivos, para mejorar la fragmentación del material y, consecuentemente, optimizar el Dig Rate de las palas en operaciones mineras a cielo abierto.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aspectos generales de la mina

2.2.1.1. Ubicación

Ubicada en el flanco oriental de la cordillera de los Andes, en el sur del Perú, se encuentra una de las explotaciones mineras más importantes del país, asentada en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, en el departamento de Moquegua.

Está delimitada por las coordenadas UTM: 317 685 E–8 117 350 N y 319 515 E–8 115 815 N.

The figure consists of two maps. The left map shows the outline of Peru with its regional divisions. Neighboring countries are labeled: COLOMBIA to the north, ECUADOR to the northwest, BRASIL to the northeast, BOLIVIA to the east, and CHILE to the south. The OCEANO PACIFICO is to the west. A small area in the southeast is highlighted in yellow and pink, with a black arrow pointing from it to a larger, more detailed map on the right. The right map is a detailed topographic and hydrological map of the study area. It shows the city of MOQUEGUA and surrounding towns like TORATA, TOTA, TALA, and TOCALAYA. Rivers such as Rio Santa, Rio Tumbes, Rio Chupacama, Rio Chila, Rio Cutervo, and Rio Tarma are depicted. The map also shows the location of the 'Unidad de estudio' (study unit) near Torata. The map is color-coded with yellow for land and blue for water.

2.2.1.2. Accesibilidad

El acceso principal se realiza por vía terrestre desde la ciudad de Moquegua, siguiendo una ruta asfaltada que asciende progresivamente por el valle del río Torata. Las rutas descritas en la Tabla 2.

Tabla 2

Accesibilidad a la Mina de Estudio

Tramo	Distancia aproximada (km)	Tiempo estimado (horas)	Vía Principal
Moquegua – Torata	24	0.4	Carretera asfaltada (ruta departamental)
Torata – Unidad minera	38	0.5	Camino afirmado de montaña
Ilo – Moquegua	95	2	Panamericana Sur
Tacna – Moquegua	160	2	Carretera Binacional
Arequipa – Moquegua	265	4	Panamericana Sur

2.2.1.3. Características de la mina de estudio

La producción de la mina inició en 1976, llegando a obtener una longitud del tajo (N-S) de 2,9 Km y el ancho (E-O) de 3,1 Km, con las características de diseño principales que se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3

Características Principales del Tajo

	Característica	Valor
Altura de banco		15 m.
Ángulos inter-rampa		38-50°
Ángulos de talud		60-70°
Gradiente de rampa diseño		8 % - 10 %
Ancho mínimo de minado		80 m.
Ancho vía a doble sentido		40 m.

2.2.1.4. Operación de minado de la mina del presente estudio

El ciclo de minado es el conjunto de actividades secuenciales necesarias para extraer el material útil (mineral) o estéril desde el macizo rocoso hasta su destino final (planta, botadero o chancado). Este ciclo se repite continuamente y está compuesto por las siguientes etapas fundamentales:

2.2.1.4.1. Perforación

La ejecución de los taladros de producción se lleva a cabo mediante 6 perforadoras de diferentes marcas y modelos, los cuales operan con brocas de diámetros de 10 5/8” y 12 1/4”, y de 5” en el caso de los taladros de pre-corte. En cada perforación se incorpora, un metro adicional de sobre perforación respecto a la altura del banco. Asimismo, las operaciones se apoyan en el sistema

MineOperate, una herramienta tecnológica que permite el monitoreo y control en tiempo real de los procesos mineros.

Tabla 4

Características Principales de las Perforadoras usadas en el Tajo

PERFORADORA	TIPO
D13	Bucyrus 49RIII
D14	Bucyrus 49HR
D16	P&H 320XPC
D17	P&H 320XPC
D18	CAT MD6640
D19	CAT MD6640

Tabla 5

Parámetros de Perforación por Tipo de Roca

Broca 12 1/4	PullDown (Klbs.)	R.P.M.	Presión de aire (PSI)
Duro	80	60-65	45-60
Medio	70	70	45-60
Suave	60	80	45-60

– Diseño de malla de perforación

Para establecer el burden en la mina de estudio, considerando un diseño de bancos de 15 metros y taladros con diámetros de 12 ¼ y 10 5/8 pulgadas, se toma como punto de partida el modelo matemático propuesto por Pearse. Donde integra en su fórmula variables relacionadas con las características geológicas, geotécnicas y del explosivo utilizado.

Fórmula de Pearse:

$$R = B = \frac{K \emptyset}{12} \sqrt{\frac{P_2}{S_{td}}} \quad (1)$$

R = Radio Critico

B = Burden (ft).

$\emptyset$ = Diámetro del taladro (pul).

P2 = Presión de detonación de la Mezcla Explosiva Comercial (Psi).

S_{td} = Resistencia tensional dinámica de la roca (Psi). (Compresión Uniaxial)

K = Constante que depende de las características de las rocas (0.7 a 1.0)

$$K = 1.96 - 0.27 \ln (ERQD) \quad (2)$$

Tabla 6 ERQD = Índice de la calidad de la roca (%).

ERQD = RQD x JSF.

RQD = Índice de Calidad de Roca.

JSF = Factor de corrección de la resistencia de los contactos.

Estimación de la Calidad de la Roca JSF

Estimación de la calidad de la roca	JSF
Fuerte	1
Media	0.9
Débil	0.8
Muy débil	0.7

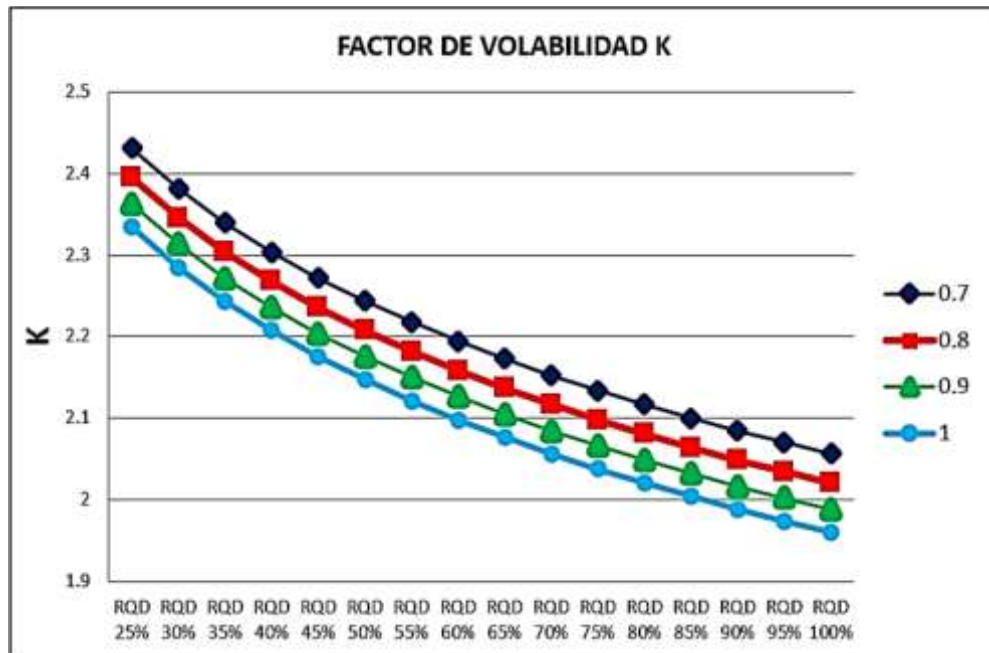
Tabla 7

RQD vs Factor de Corrección de la Resistencia de los Contactos

FACTOR K					
J					
Valores	0.7	0.8	0.9	1	PROMEDIO
RQD 25%	2.43	2.39	2.36	2.33	2.38
RQD 30%	2.38	2.35	2.31	2.29	2.33
RQD 35%	2.34	2.3	2.27	2.24	2.29
RQD 40%	2.3	2.27	2.24	2.21	2.25
RQD 45%	2.27	2.24	2.2	2.18	2.22
RQD 50%	2.24	2.21	2.28	2.15	2.19
RQD 55%	2.22	2.18	2.15	2.12	2.17
RQD 60%	2.19	2.16	2.13	2.1	2.14
RQD 65%	2.17	2.14	2.1	2.08	2.12
RQD 70%	2.15	2.12	2.08	2.06	2.10
RQD 75%	2.13	2.1	2.07	2.04	2.08
RQD 80%	2.12	2.08	2.05	2.02	2.07

Figura 2.

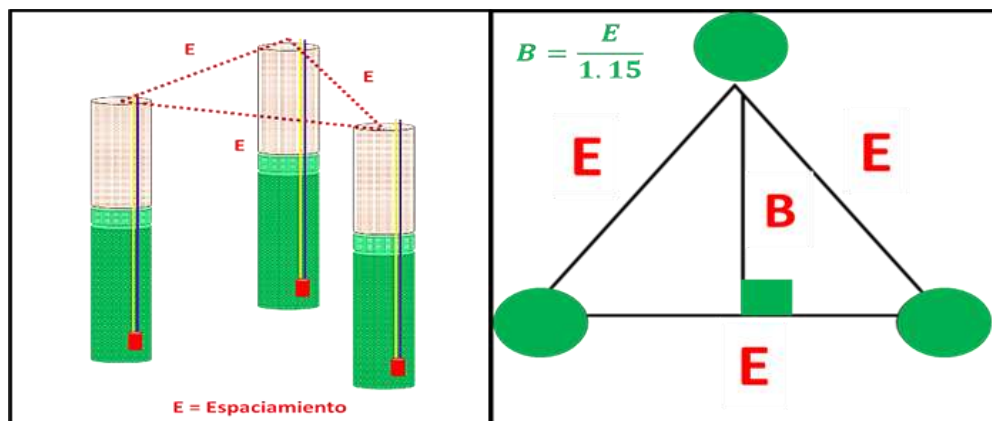
Comparación de Indicadores de Calidad para hallar el Factor K



Así mismo, en la Mina de estudio se diseñan las mallas en diseño geométrico triángulo equilátero, diseño estándar para todas las mallas.

Figura 3.

Diseño de Malla Triangular Equilátera Mina de Estudio



Nota: Estudio técnico del área de Perforación y Disparos

– **Longitud de taco**

El taco hace referencia a la parte superior del taladro que se rellena con material grava o desmante, cuya función principal es confinar la energía generada por la voladura, permitiendo una adecuada fragmentación de la roca. Cuando la longitud del taco es insuficiente, los gases pueden liberarse prematuramente, provocando efectos indeseados como ondas aéreas y proyección de fragmentos (Fly Rocks). En cambio, un exceso en el taco puede dar lugar a fragmentos de mayor tamaño y a una pila de material con escaso esponjamiento.

Para determinar la longitud adecuada del taco se utiliza la fórmula basada en el factor de seguridad dinámico (SD).

$$SD = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (3)$$

Donde:

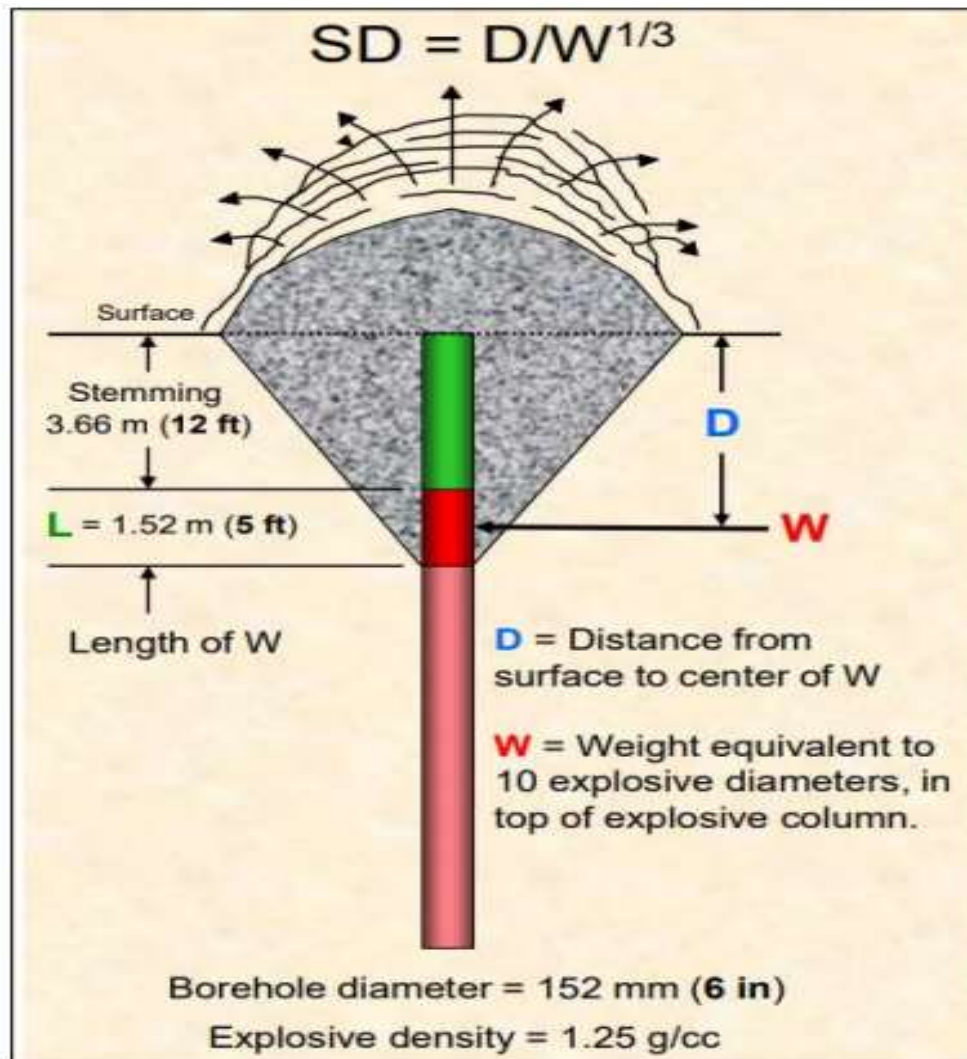
SD = Factor de Taco

D = Distancia desde el centro de W a la superficie

W = Peso del explosivo ocupado en la parte superior de la columna de explosivo (kg).

Figura 4.

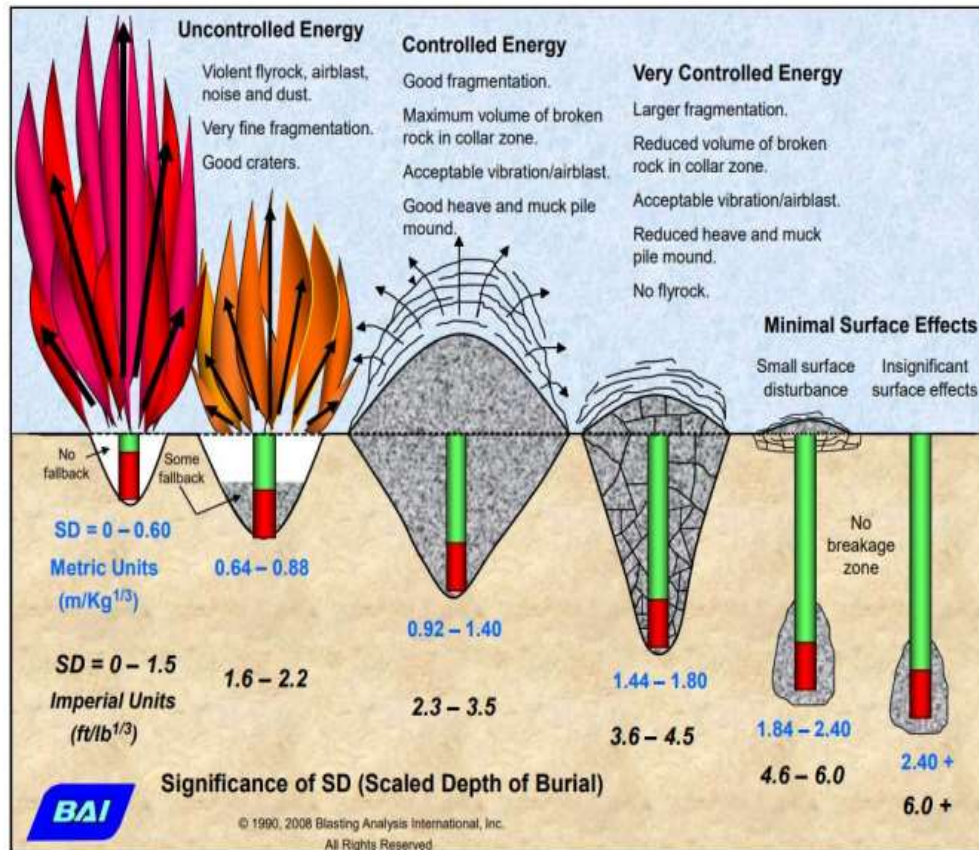
Diagrama de Factor SD



Nota: Frank Chiappetta (2010)

Figura 5.

Escenarios de Cálculo de Factor SD



Nota: Frank Chiappetta (2010).

2.2.1.4.2. Voladura

A. Tipos de voladura:

En minería a cielo abierto, las voladuras se clasifican según su finalidad y técnica de ejecución. A continuación, se presentan los principales tipo:

– Voladura de producción

Es la más común en operaciones a cielo abierto. Consiste en la fragmentación del macizo rocoso mediante una malla de perforación diseñada para optimizar la fragmentación y facilitar las operaciones posteriores de carguío y transporte. Según Salinas Ninahuanca (2022), una adecuada planificación de la voladura en banco es esencial para controlar el grado de fragmentación y, por ende, mejorar la eficiencia de los equipos de carguío y acarreo.

- **Voladura de pre-corte**

Esta técnica se utiliza para delimitar los contornos de la excavación y minimizar el daño a las paredes del banco. Se realiza mediante la perforación de una línea de taladros con cargas reducidas, que actúan como una barrera para las ondas de choque de la voladura principal. Casani Huamani (2022) destaca que el precorte es fundamental para mantener la estabilidad de los taludes y reducir el sobreconsumo de explosivos.

- **Voladura de contorno**

Similar al precorte, pero enfocada en obtener superficies regulares y estables en los contornos de la excavación. Se emplea para mejorar la calidad del perfil final y facilitar las operaciones de sostenimiento. Según Posada Perú (2021), la voladura de contorno permite obtener superficies sanas y regulares, esenciales para la estabilidad de la excavación.

- **Voladura Secundaria**

Se realiza para fragmentar bloques de roca de gran tamaño que no fueron adecuadamente fracturados en la voladura principal. Es esencial para garantizar la continuidad de las operaciones de carguío y trituración. Según Black Diamond Drilling (2021), la voladura secundaria es crucial para reducir el tamaño de los fragmentos y facilitar su manejo.

B. Detonadores electrónicos:

Los detonadores electrónicos representan una evolución significativa frente a los sistemas de iniciación tradicionales como los pirotécnicos, al ofrecer mayor precisión y control en el proceso de voladura. De acuerdo con Paredes (2014), su función principal es iniciar la detonación de la carga explosiva, pero a diferencia de los convencionales, estos dispositivos permiten una programación exacta de los tiempos de retardo, con rangos que van desde 0 hasta 15 000 milisegundos y con incrementos de apenas 1 milisegundo, logrando una precisión de $\pm 0,1$ %, lo cual minimiza el riesgo de superposición de ondas de choque y favorece una fragmentación más eficiente del macizo rocoso.

Por otro lado, cada detonador electrónico posee un número de identificación único de fábrica, lo que facilita su trazabilidad y control durante las operaciones (Paredes, 2014; Orica, 2021). Además, el sistema permite una comunicación bidireccional entre el dispositivo de control y el detonador, lo cual garantiza que cada componente funcione correctamente antes de la iniciación. Para establecer las

conexiones, los cables deben ser insertados individualmente en las ranuras terminales del conector, lo que simplifica el proceso y reduce errores de conexión (Orica, 2021; Álvarez & Rojas, 2020).

Este tipo de tecnología ha sido ampliamente adoptada en operaciones mineras de mediana y gran escala, ya que mejora la seguridad, permite una mayor flexibilidad en el diseño de la voladura y contribuye a una mejor estabilidad del banco de excavación (Camacho et al., 2018; INATEC, 2022).

Figura 6.

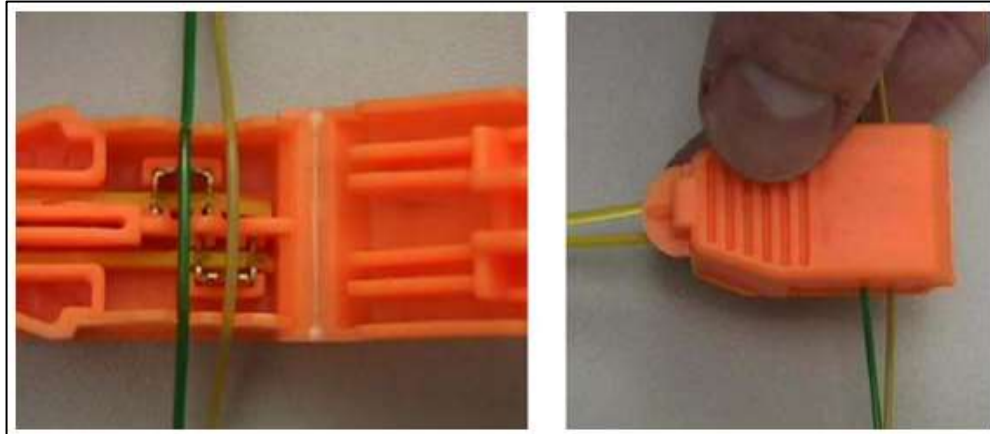
Componentes del Sistema Eléctrico



Nota: Sistema de iniciación electrónica usado en la mina de estudio.

Figura 7.

Conexión del Detonador Electrónico



Nota: Conexión del detonador electrónico usado en la mina de estudio.

Figura 8.

Estructura Interna de un Detonador Electrónico



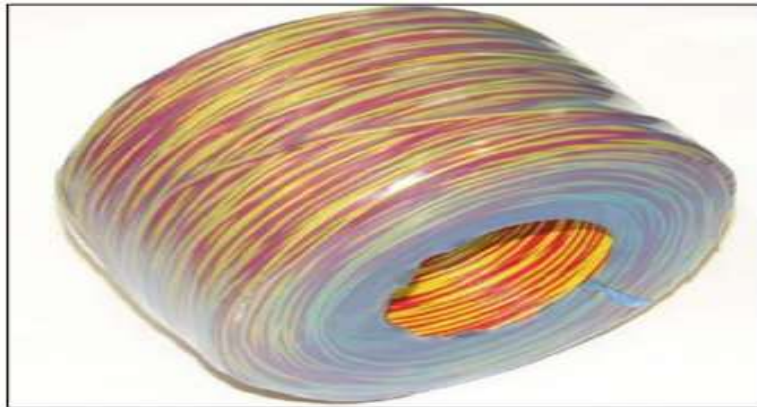
Nota: Diseñada para ofrecer alta precisión y seguridad en la iniciación de explosivos.

– Cable de conexión

El cable de comunicación bidireccional se emplea en las voladuras para establecer la conexión entre los detonadores electrónicos. Asimismo, permite enlazar el dispositivo de registro (logger) con el equipo de iniciación (blaster).

Figura 9.

Cable de Conexión



Nota: Transmite señales eléctricas desde la unidad de programación de disparo hasta el detonador.

– **Logger**

El Logger es un componente fundamental del sistema de voladura electrónica, utilizado para verificar el estado de los taladros en un proyecto. Esta función puede realizarse mediante el software ShotPlus I o de forma manual. Entre sus principales tareas se encuentran:

- Validar el funcionamiento de cada detonador.
- Leer y almacenar en memoria el número de identificación (ID) de cada dispositivo.
- Realizar un test de continuidad para revisar el estado tanto del detonador como del cableado.
- Programar los tiempos de retardo para la detonación.
- Operar con una salida de 5 voltios.
- Registrar hasta un máximo de 200 detonadores por equipo.

Figura 10.

Rogger



Nota: Dispositivo portátil utilizado en voladuras electrónicas para leer, programar y verificar los detonadores antes de la detonación.

– **Blaster**

Una vez finalizadas las conexiones, verificaciones y la asignación de tiempos para los taladros incluidos en el diseño de voladura, se lleva a cabo la iniciación mediante el equipo denominado blaster. Este dispositivo se encarga de realizar un diagnóstico completo y automático del sistema, asegurando que tanto la programación como la funcionalidad de los detonadores sean correctas.

Entre sus características destacan:

- Capacidad de controlar hasta 1600 detonadores.
- Sistema exclusivo con códigos separados para armado y disparo.
- Incorpora una llave digital de activación como medida de seguridad.
- Funciona con una salida de 24 voltios.

Figura 11.

Blaster – Iniciador de Voladura



Nota: Dispositivo de activación electrónica. Inicia la voladura en un sistema electrónico.

C. Mezcla explosiva:

La mezcla explosiva usada en la unidad de estudio está compuesta de:

MEZCLA GASIFICADA:

Definición: Son emulsiones base (Slurrex G) que se sensibilizan en el momento de la carga mediante un proceso de gasificación química (inyección controlada de una solución gasificante que genera microburbujas internas de gas). Este proceso ajusta la densidad y sensibilidad según las condiciones del taladro.

Características principales:

- Estado físico: emulsión a granel antes de gasificar.
- Sensibilización: por gasificación in situ (generalmente con nitrito sódico)

- Densidad: ajustable ($1.00 - 1.25 \text{ g/cm}^3$ según mezcla y gasificación).
- Velocidad de detonación: media a alta ($4,000 - 5,200 \text{ m/s}$).
- Ventaja: se puede adaptar al tipo de roca o presencia de agua, optimizando la energía.
- Usos típicos: bancos medianamente duros, taladros con presencia de agua o donde se busca reducir gases nocivos.

MEZCLAS GASIFICADAS

- Mezcla gasificada Quantex 73: que consta de 70 % de emulsión Slurrex G, 30 % de nitrato Quantex, las proporciones de diésel se mantienen.
- Mezcla gasificada Quantex 82: el cual contiene 80 % de Emulsión y 20 % de la sustancia denominada Nitrato Quantex, las proporciones de diésel se mantienen.
- Mezcla gasificada Quantex 91: Contiene 90 % de Emulsión Slurrex G y 10 % de Nitrato Quantex, las proporciones de diésel se mantienen.

Figura 12

Cargado de Explosivos en Proyectos de Voladura de la Unidad Minera de Estudio



Nota: Etapa crítica para garantizar una voladura eficiente, segura y controlada.

En la siguiente tabla, se observarán las densidades de las distintas mezclas explosivas que se pueden formar. (Segarra, Sanchidrián, & Castillo, 2019).

Tabla 8

Parámetros de Perforación por Tipo de Roca

Mezcla explosiva gasificada	Densidad inicial (gr/cc)
Mezcla 70/30	1.37
Mezcla 75/25	1.36
Mezcla 80/20	1.35
Mezcla 90/10	1.34

Nota: Densidades de las distintas mezclas explosivas (Segarra, Sanchidrián, & Castillo, 2019).

Así mismo, se viene probando el Explosivo energético.

El Explosivo energético es un explosivo de emulsión bombeable lista para usar, que ya están sensibilizadas químicamente en fábrica. Diseñado para su uso en voladuras de producción en minería a cielo abierto. Este producto se caracteriza por su alta resistencia al agua y su excelente desempeño en condiciones operativas exigentes, tales como barrenos húmedos o zonas desaguadas. Poseen una alta energía específica, alta velocidad de detonación (VoD) y gran estabilidad química, por lo que no requieren procesos adicionales antes de la carga.

Su formulación incluye principalmente nitrato de amonio, mezclado con combustibles y otros componentes no peligrosos, lo que permite una liberación eficiente de energía y una fragmentación óptima del macizo rocoso. Además, el Explosivo energético pertenece a la clasificación 1.5D según normas internacionales, lo que lo convierte en un explosivo seguro para el transporte y almacenamiento, al presentar bajo riesgo de detonación accidental. Su uso ha sido ampliamente implementado en operaciones de gran escala por su confiabilidad, energía controlada y adaptabilidad a distintos tipos de terreno (Orica, 2016).

Características principales:

- Estado físico: emulsión bombeable homogénea.
- Sensibilización: química permanente (microesferas o aditivos sensibilizantes).

- Densidad: generalmente constante (1.15 – 1.25 g/cm³).
- Velocidad de detonación: alta (5,000 – 6,000 m/s).
- Ventaja: desempeño energético alto, buena transmisión de onda de choque y fragmentación fina.
- Desventaja: costo mayor y menor posibilidad de ajustar densidad en campo.
- Usos típicos: rocas duras o bancos con alta resistencia.

MEZCLAS ENERGÉTICAS

- Mezcla energética Extra 70: Contiene 70 % de Emulsión Energética y 30 % de Nitrato Grado ANFO
- Mezcla energética Extra 80: Contiene 80 % de Emulsión Energética y 20 % de Nitrato Grado ANFO

D. Tiempo de retardo:

La labor de amarre está a cargo de la empresa contratista. La programación de las detonaciones se realiza en coordinación con las áreas de voladura y geotecnia, quienes establecen los criterios necesarios para determinar el momento adecuado de cada disparo. En este proceso, geotecnia emite recomendaciones específicas sobre los intervalos de iniciación, que son:

- Los tiempos entre taladros oscilan entre 10 y 23 milisegundos.
- Los tiempos entre filas se sitúan en un rango de 100 a 200 milisegundos.

E. Accesorios de voladura:

– **Booster**

Se trata de una carga de explosivo de alta potencia, que no incorpora accesorios, y cumple dos funciones principales: asegurar la continuidad del proceso de iniciación iniciado por el detonador principal dentro de la columna de explosivo y generar zonas de alta concentración de energía a lo largo de dicha columna.

Figura 13.

Booster de 2 lb.



Nota: Ficha técnica FAMESA

– **Fanel**

Es un componente ampliamente utilizado para la iniciación en operaciones mineras, ya que permite establecer conexiones confiables y evita fallas en los enlaces. Está conformado por dos partes fundamentales: un fulminante con retardo y un elemento que regula el tiempo de detonación, lo que facilita disparos

secuenciales. Además, incluye un tubo de choque fabricado con material termoplástico mediante un proceso mecánico, en su parte interna posee un canal, que genera una onda de choque cuya temperatura y presión son adecuadas para activar el fulminante de retardo.

Figura 14.

Fanel



Nota: Ficha técnica ORICA.

– **Detonador I-KON**

El sistema de voladura I-KON se posiciona como uno de los más sofisticados disponibles actualmente. Este tipo de detonador permite ser configurado dentro de un rango que va desde 0 hasta 15 000 milisegundos, con una resolución mínima de 1 milisegundo entre cada intervalo, lo que proporciona una amplia flexibilidad en la secuencia de disparo. Además, ofrece una alta precisión

F. Malla de voladura:

La fragmentación deseada, de acuerdo con las necesidades específicas de la planta, constituye un aspecto clave en la planificación de una voladura. Esta depende de varios factores, como el diámetro de los taladros, el diseño de la malla de perforación, el tipo y la cantidad de explosivo empleado, así como los intervalos de tiempo entre las detonaciones. Así mismo, se considera:

– El carguío de taladros:

Inicialmente, se realizó el primado, introduciendo el Ikon y Fanel a los orificios del Booster, posteriormente, se descendió la prima en el interior del taladro. Al momento de cargar y tapar los taladros, se ubicó al camión mezclador en un lugar seguro para las líneas descendentes, se cargó con una manga que se posicionó en forma vertical al centro del taladro; la cantidad de explosivo utilizado por taladro se visualiza en un sistema integrado del camión mezclador.

Finalizando, para el tapado de los taladros se utilizó un minicargador y se procedió con el llenado de los taladros con material detrito.

– El amarre de malla de voladura:

La secuencia del amarre se llevó a cabo por el personal de amarre electrónico (Ikon), los cuales realizan el amarre previamente habiendo designado el orden en un plano desarrollado por la empresa.

G. Factor de carga:

Es un parámetro que indica la cantidad de explosivo utilizada por cada metro de profundidad del taladro. Se expresa generalmente en kilogramos por metro (kg/m) y permite evaluar la distribución del explosivo a lo largo del barreno. Este valor es fundamental para asegurar que la energía generada durante la voladura sea suficiente y uniforme, garantizando una buena fragmentación del macizo rocoso y evitando problemas como sobre rotura o fragmentos excesivamente grandes.

$$F.C = \frac{Q}{B * E * H} \quad (4)$$

Donde:

Q = Cantidad de explosivo (Kg).

B= Burden (m).

E = Espaciamiento (m).

H = Altura de banco (m).

H. Ajuste de diseño de taladros por desviación:

Presión dinámica:

Se refiere a la fuerza ejercida por los gases generados tras la detonación del explosivo, a medida que estos se expanden rápidamente por las fracturas y

discontinuidades del macizo rocoso. Esta presión actúa en muy corto tiempo y es responsable directa de la fragmentación primaria de la roca. Su magnitud depende del tipo de explosivo, la velocidad de detonación y las condiciones de confinamiento dentro del taladro. Una presión dinámica bien controlada, permite obtener una rotura eficiente del material, sin causar daños colaterales en zonas no deseadas.

La presión dinámica desempeña un rol fundamental en la eficiencia del proceso de voladura, especialmente cuando se vincula con el diseño de salida y la programación de los tiempos de detonación asignados a cada taladro dentro del esquema de iniciación.

Al activarse un taladro, los gases generados por la explosión ejercen una presión intensa que necesita una vía libre para expandirse. Esta condición se alcanza mediante una correcta disposición de la cara libre y una secuencia de disparo que facilite la liberación progresiva de la energía. Si los tiempos de retardo entre taladros no están debidamente calculados, pueden generarse complicaciones:

- **Retardos demasiado cortos:**

Provocan que varios taladros detonen casi al mismo tiempo, sin permitir la formación previa de una cara libre. Esto limita la expansión de los gases, lo que puede derivar en sobre roturas, mala fragmentación y rebote de energía dentro del macizo rocoso, disminuyendo notablemente la eficiencia de la voladura.

- **Retardos bien distribuidos:**

Aseguran que cada taladro se dispare luego de que el anterior haya creado una zona de alivio. Esto favorece que la presión dinámica se dirija hacia la cara libre, mejorando la fragmentación y minimizando efectos no deseados como proyecciones de roca, exceso de vibraciones o fragmentos de gran tamaño.

Para lo cual se consideran las siguientes distancias críticas entre taladros dependiendo del diámetro de perforación.

Tabla 9

Distancia Crítica por Diámetro de Perforación

Φ perforación (Pulg.)	Distancia (m.)
12 1/4"	5
10 5/8"	4.5
9 7/8"	4
7 7/8"	3.5
6 1/2"	3

Nota: ORICA (2021)

En el caso de taladros con un diámetro de 12 1/4", se establece que el espaciamiento mínimo debe ser de 5 metros. Bajo este criterio, la desviación máxima permitida durante la perforación no debe exceder los 3.00 metros.

Si la desviación registrada supera dicho límite, se procede a realizar ajustes en la carga del taladro, reduciendo la cantidad de explosivo en un 25 % con el objetivo de minimizar riesgos operativos y garantizar una voladura controlada.

Adicionalmente, se modifica la profundidad de las primas del taladro adyacente al taladro desviado. En particular, se reduce la profundidad de la prima correspondiente al taladro que presenta mayor carga explosiva, dejándola con una longitud de un metro por debajo de la altura del taco.

Cuando la desviación sobrepasa el espaciamiento originalmente diseñado entre taladros, se incorpora un taladro auxiliar entre ambos. Este taladro adicional es de 5 pulgadas de diámetro, con una carga de aproximadamente 170 kg de explosivo y un taco de 5 metros, contribuyendo así a mantener la uniformidad en la fragmentación.

2.2.1.4.3. Carguío

Dentro del ciclo de minado, el carguío corresponde a la operación de trasladar el material fragmentado hacia los volquetes para su posterior transporte. En la unidad minera Cuajone, esta labor es realizada con el apoyo de seis palas operativas.

Tabla 10

Palas Operativas en Mina

CÓDIGO DE PALA	TIPO	CAPACIDAD NOMINAL (t)
P01	P&H 2800XPB	59
P03	P&H 4100A	73
P04	Bucyrus 495BII	73
P05	Bucyrus 495HR	100
P06	Bucyrus 495HR	100
P07	P&H 4100 XPC	105

Nota: Palas usadas en la mina de estudio.

Figura 16.

Pala 6 Realizando Carguío en Mina



Nota: Fotografía recopilada del área de operaciones de la mina, 2025

2.2.1.4.4. Acarreo

El sistema de acarreo se realiza mediante volquetes, los cuales se movilizan por las diferentes fases de la mina. La etapa de acarreo se realiza de forma directa desde la pala hacia el volquete.

De acuerdo con Olazabal (2014), las rampas internas destinadas al tránsito de volquetes en la zona de extracción de la mina presentan pendientes que no superan el 10 %, siendo incluso menores en comparación con las pendientes de las rutas externas por las que transitan estos equipos durante las operaciones de acarreo.

Tabla 11*Volquetes Operativos en Mina*

MODELO	CANTIDAD	CAPACIDAD NOMINAL (t)
Komatsu 930E	4	290
Komatsu 930E-4	9	290
Komatsu 930E-4SE	2	290
Komatsu 980E-4	9	369
Caterpillar 793D	2	232
CAT 797F	18	363
Caterpillar 798AC	2	372

Nota: Volquetes usados en la mina de estudio.

2.2.2. Dig Rate de las Palas

El Dig Rate, también conocido como tasa de excavación, es un indicador fundamental en las operaciones mineras, ya que permite evaluar la eficiencia del proceso de carguío. Este término hace referencia a la velocidad con la que una pala realiza su ciclo completo de carga, desde el primer pase hasta la finalización del último, y se expresa comúnmente en toneladas por hora (t/h).

Uno de los aspectos más relevantes que inciden en el Dig Rate es la calidad de la fragmentación del material, resultado directo del diseño y ejecución de la perforación y voladura. Una fragmentación adecuada facilita el trabajo de la pala, reduciendo los tiempos de ciclo y permitiendo un mayor rendimiento horario. En contraste, una mala fragmentación, con presencia de bloques grandes, puede dificultar la excavación y reducir significativamente la eficiencia del equipo.

Este indicador se calcula considerando la siguiente relación:

$$\text{Dig Rate} \left(\frac{tn}{h} \right) = \frac{\text{tonelaje nominal}}{\text{tiempo de carguío}} \quad (5)$$

Donde:

- Tonelaje Nominal = Capacidad de Carga Útil del Equipo * Factor de Ajuste
- Tiempo de carguío = Ciclo de carguío

El tonelaje nominal se obtiene multiplicando la capacidad de carga útil del equipo por un factor de ajuste, que corrige el tonelaje según el contenido de humedad del material. Este factor puede expresarse como:

$$\text{Factor de ajuste} = \frac{TMH - \% \text{ humedad}}{TMS} \quad (6)$$

Donde TMH y TMS se determinan a partir de reportes operativos, como los proporcionados por sistemas de monitoreo tipo Leica.

Por su parte, el tiempo de carguío corresponde al periodo que transcurre desde que la pala comienza a cargar un camión hasta que este abandona el frente de trabajo. Es importante destacar que este tiempo no incluye periodos de detención o inactividad del equipo, por lo que el Dig Rate refleja exclusivamente el rendimiento efectivo del ciclo de carga.

- Fragmentación del material

La calidad de la voladura es crucial:

- Material bien fragmentado = mayor Dig Rate
- Material con bloques grandes = menor Dig Rate
- Tiempo de ciclo
 - Incluye: tiempo de excavación, giro, descarga, y regreso.
 - Ciclos más rápidos aumentan el Dig Rate.
- Importancia del Dig Rate
 - Indicador de eficiencia operativa.
 - Permite comparar el rendimiento entre proyectos o turnos.
 - Influye directamente en el costo por tonelada cargada.
 - Útil para evaluar el impacto del control de calidad en perforación y voladura.

2.2.3. Desviación de taladros

El control de calidad en la perforación incluye diversas variables como la precisión en la ubicación de los taladros, la profundidad, el ángulo de inclinación, y la rectitud de los barrenos. Desviaciones leves (menores a 3 m) pueden tolerarse, pero desviaciones mayores alteran la distribución de energía del explosivo y generan zonas con roca sin fragmentar o excesivamente triturada, según Nieto (2021), en su tesis titulada Desviaciones en perforación y su impacto en el diseño de mallas de voladura, cuyo objetivo fue analizar cómo las desviaciones afectan el diseño y resultado de la voladura. La conclusión de su trabajo indica que el control

estricto de los parámetros de perforación mejora la eficiencia del disparo y optimiza la fragmentación del macizo rocoso.

- Causas de la desviación de taladros

A. Condiciones geológicas del terreno:

La presencia de formaciones con litologías variables, zonas de falla, fracturas o materiales con distinta resistencia mecánica puede provocar que la broca desvíe su trayectoria natural. La perforación en rocas con alternancias de dureza tiende a generar desviaciones laterales, debido a la resistencia desigual al avance del equipo.

B. Desgaste de aceros:

Una broca desgastada o en mal estado no corta la roca de manera uniforme, lo que afecta directamente la dirección del avance. Del mismo modo, barras de perforación dobladas o mal alineadas pueden inducir trayectorias irregulares.

C. Errores en la nivelación de la perforadora:

Si el equipo no se encuentra debidamente nivelado al inicio del trabajo, el ángulo de entrada del taladro no corresponderá con el especificado en el diseño, generando una desviación desde los primeros metros del barreno.

D. Parámetros de operación:

La velocidad de penetración excesiva, la presión inadecuada del equipo sobre el terreno o una deficiente estabilización durante el proceso de perforación

pueden generar vibraciones o movimientos fuertes no deseados, provocando una trayectoria curva o inclinada en el taladro.

E. Interrupciones durante la perforación:

Paradas repentinas por fallas mecánicas o baja presión de aire pueden hacer que el equipo retome el trabajo en una dirección ligeramente distinta a la original, especialmente si no se verifica el eje y profundidad antes de reiniciar.

F. Errores en el GPS de las perforadoras:

Una mala marcación de los puntos de perforación o una lectura incorrecta del sistema de posicionamiento, por descalibración, también puede llevar a que el taladro no se realice en el lugar previsto, afectando la geometría de la malla de voladura.

Según proveedor este factor tiene un error de +/- 0.1 metros (10 cm.)

2.3. Definición de términos

a. Taladro de producción

Es un orificio cilíndrico perforado en la roca mediante equipos especializados, diseñado para alojar una carga explosiva. Su ubicación, profundidad y orientación deben ser precisas para lograr una fragmentación controlada del macizo rocoso durante la voladura.

b. Desviación de taladros de producción

Se refiere a cualquier diferencia o error entre la trayectoria planificada del taladro y su ejecución real. Estas desviaciones pueden ser en profundidad, inclinación o dirección, y afectan la efectividad de la voladura al alterar la distribución energética del explosivo.

c. GPS (Sistema de Posicionamiento Global)

Tecnología basada en satélites que permite determinar con alta precisión la ubicación y orientación de los equipos de perforación. Su correcta calibración es esencial para asegurar que los taladros de producción se realicen de acuerdo al diseño técnico.

d. Explosivo

Sustancia química capaz de liberar energía de forma súbita mediante una reacción de detonación. En minería, los explosivos se utilizan para fracturar la roca y facilitar su excavación. Se clasifican según su velocidad de detonación, densidad, resistencia al agua y potencia energética.

e. Fragmentación

Es la distribución del tamaño de las rocas resultantes después de una voladura. Una buena fragmentación implica tamaños homogéneos que optimizan la carga y transporte del material, mientras que una fragmentación deficiente genera bloques grandes que dificultan la excavación y aumentan los costos operativos.

f. Dig Rate

Es una métrica clave en minería que mide la cantidad de material excavado por una pala en un tiempo determinado, generalmente expresada en toneladas por hora (ton/h). Depende directamente de la calidad de la fragmentación, la eficiencia de los ciclos de carga y el rendimiento del equipo de carguío.

g. Emulsión

Tipo de explosivo industrial compuesto por una mezcla de nitrato de amonio y aceite combustible, estabilizada en forma de gotas finas suspendidas en una matriz continua. Su alta densidad, resistencia al agua y control sobre la velocidad de detonación la hacen adecuada para condiciones geológicas complejas o con desviaciones en los taladros.

h. Velocidad de detonación (VOD)

Es la velocidad a la que una onda de choque se propaga a través de un explosivo. Este parámetro determina la rapidez con la que el explosivo libera energía. Explosivos con una alta velocidad de detonación generalmente generan una fragmentación más fina, mientras que los de baja VOD generan fragmentos más grandes, lo que puede afectar la eficiencia en el Dig Rate.

i. Densidad del explosivo

La densidad del explosivo es un factor clave que afecta la cantidad de energía que se libera en un volumen dado. Explosivos con mayor densidad liberan más energía en el mismo volumen, lo que favorece una fragmentación más

eficiente. La densidad debe ajustarse según la dureza de la roca y el tipo de voladura.

j. Factor de carga

Es la cantidad de explosivo que se utiliza por metro de perforación. Este factor debe ser cuidadosamente determinado para evitar sobrecargar la voladura, lo que podría generar fragmentación demasiado fina o ineficiente, o subcargarla, lo que podría resultar en una fragmentación insuficiente.

k. Secuencia de detonación

Se refiere al orden y el tiempo de detonación de los taladros en una voladura. Una secuencia de detonación bien diseñada asegura que la energía del explosivo se distribuya de manera eficiente y uniforme, lo que mejora la fragmentación y reduce la generación de bloques grandes, optimizando así el Dig Rate.

l. Tasa de excavación

Es un término similar a Dig Rate, pero se refiere más específicamente a la rapidez con la que un equipo de excavación puede extraer material del banco después de la voladura. Esta tasa está influenciada por el tamaño y la calidad de los fragmentos obtenidos y por la eficiencia de los equipos de carga.

m. Velocidad de excavación

Es la rapidez con la que se excava el material en el banco minero. Depende de la fragmentación del material (si los fragmentos son más pequeños y uniformes, la pala puede excavar más rápidamente) y de la capacidad operativa de las

máquinas. La velocidad de excavación también depende de la eficiencia del Dig Rate, que es una de las métricas clave para evaluar el rendimiento de la pala.

n. Burden

Este concepto se refiere a la separación existente entre el barreno perforado y la cara libre más próxima del banco de trabajo. Según Jimeno et al. (1995), esta distancia, denominada burden, es fundamental para garantizar una adecuada liberación de energía durante la voladura y evitar sobrepresión o confinamiento excesivo del explosivo.

o. Espaciamiento

En el diseño de voladuras en banco, esta medida corresponde a la distancia entre ejes de barrenos consecutivos, la cual se establece en dirección perpendicular al burden y paralela a la cara libre del banco. Esta variable es esencial para lograr una distribución uniforme de la energía explosiva y obtener una fragmentación controlada del macizo rocoso (Chiappetta, 1990).

p. Malla

El diseño geométrico en voladuras consiste en la disposición estratégica de los taladros dentro de un proyecto de voladura, teniendo en cuenta la relación técnica entre el espaciamiento (spacing) y la carga frente a la cara libre (burden), con el fin de optimizar la fragmentación del material y controlar los efectos de la voladura (Jimeno, Jimeno & Carcedo, 1995).

q. Voladura

La voladura es el proceso mediante el cual se detonan explosivos con el propósito de fracturar el macizo rocoso, provocar la propagación de ondas sísmicas y desplazar el material fragmentado para su posterior manipulación (Konya & Walter, 1990).

r. P80

Es un parámetro técnico que representa el tamaño de partícula en una muestra de material fragmentado, por debajo del cual se encuentra el 80 % del total en tamaño. Este indicador permite correlacionar el grado de fragmentación alcanzado con el rendimiento de los equipos de carguío o trituración, ya que una adecuada fragmentación facilita el trabajo de las palas y reduce la carga en los chancadores.

s. Detonador

Un detonador es un componente diseñado para contener un explosivo primario y cumplir la función de iniciar la detonación de una carga. Este término abarca distintos tipos de dispositivos, como los detonadores eléctricos, electrónicos, de retardo, no eléctricos, además de los elementos auxiliares necesarios para su activación, como cables de conexión, sistemas de seguridad o cualquier otro componente que cumpla la misma función (Langefors & Kihlström, 1978).

t. Tonelaje a disparar

Se refiere al volumen de material contenido en una malla de perforación que será fragmentado mediante el proceso de voladura. Este valor se estima en base a

las dimensiones del diseño de la malla (burden, espaciamiento, altura de banco y densidad del material), y representa el total de toneladas que se espera fragmentar en un evento de voladura.

u. Tonelaje minado

Corresponde al volumen real de material que fue extraído del frente volado mediante el uso de maquinaria de carguío, como palas o cargadores frontales. Este tonelaje puede diferir del tonelaje inicialmente proyectado a disparar, debido a factores como sobre excavación, pérdidas por esponjamiento, o la existencia de zonas que no pudieron fragmentarse adecuadamente.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Planteamiento metodológico

La presente investigación busca evaluar cómo el control de calidad en los taladros de producción, en relación con el límite máximo o tolerable de desviación por diferentes causas y la elección del tipo de explosivo, influye en el rendimiento del Dig Rate de las palas en una operación minera ubicada en el sur del país. El enfoque metodológico responde a la necesidad de establecer relaciones cuantificables entre las variables independientes (control de calidad en taladros de producción) y dependientes (velocidad de excavación y calidad de fragmentación).

3.1.1. Tipo de estudio

El estudio es cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos para determinar la correlación entre las variables mencionadas. Se sustenta en métodos estadísticos que permitirán establecer relaciones causales y determinar el impacto del control de calidad en el desempeño del Dig Rate.

3.1.2. Nivel de investigación

La investigación se desarrolla a nivel aplicativo, ya que tiene como propósito utilizar el conocimiento generado para mejorar procesos específicos dentro del contexto operativo de la minería a cielo abierto. En este caso, se busca aplicar los resultados obtenidos sobre el control de calidad en perforación y voladura para optimizar el Dig Rate de las palas. Según Sampieri, Collado y Lucio (2014), la investigación aplicada se orienta a resolver problemas concretos y prácticos mediante la aplicación del conocimiento científico.

3.1.3. Diseño de la investigación

El diseño es no experimental, transversal y correlacional. No experimental porque no se manipulan las variables, sino que se observan en su contexto real de operación minera. Es transversal porque se recogen datos en un periodo determinado. Es correlacional porque busca establecer el grado de relación entre el control de calidad y el Dig Rate.

3.2. Población y muestra de estudio

La población está constituida por todos los disparos ejecutados durante todo el año en la mina de estudio.

La muestra incluye a los proyectos de perforación de la Fase 9, tomándose los siguientes proyectos:

Tabla 12

Proyectos a Evaluarse en el Presente Trabajo

NIVEL	PROYECTO	CANTIDAD DE TALADROS
3655	920	296
3655	921	330
3655	926	199
3655	927	175
3655	928	214
3655	929	250

3.3. Equipos y materiales

Durante el desarrollo de la presente investigación, se utilizaron materiales básicos de oficina, como cuadernos y papel, para registrar observaciones y generar impresiones necesarias. Para el análisis de datos y la elaboración del informe, se contó con el uso de una computadora portátil y dispositivos de almacenamiento USB, los cuales permitieron la extracción de información. Asimismo, se recurrió a programas informáticos adecuados para el tratamiento de datos, incluyendo Microsoft Excel y el paquete Office 2016.

3.4. Técnicas de recolección de datos

A. Técnica

Se emplearon técnicas de recolección directa, con los siguientes métodos:

- Registros automatizados de GPS en las perforadoras para medir desviaciones en taladros.

- Análisis fotográfico de fragmentación posterior a voladura.
- Lectura de ciclos operativos de las palas mediante sensores integrados y sistema de despacho.
- Reportes de calidad del área de perforación y voladura.

B. Instrumentos

– Formato de taladros perforados

Se extrajo del sistema JView la información de todos los taladros perforados, precisa información sobre el inicio y fin de cada taladro perforado, la duración de su perforación, coordenadas planeadas y reales.

– Formato de Fragmentación P80.

Se extrajo del sistema JView la información del Reporte de P80 de las palas correspondientes a los proyectos mencionados.

– Formato de Dig Rate.

Se solicitó a sistema Dispatch los reportes diarios sobre el Dig Rate de las palas, asimismo detalla el polígono donde la pala minó correspondiente a los proyectos considerados para el presente estudio.

3.5. Técnicas para el procesamiento de datos

Las acciones llevadas a cabo durante el procesamiento y análisis de los datos fueron las siguientes:

3.5.1. Tabulación de información

Todos los datos fueron registrados y organizados en hojas de cálculo en Excel como base de datos. La información fue clasificada por:

- Taladro individual (ID, profundidad, coordenadas, desviación).
- Tipo de explosivo utilizado.
- Fragmentación resultante (Pulg.).
- Velocidad de excavación (minutos por ciclo).
- Tasa de excavación (t/h).

3.5.2. Tratamiento y análisis estadístico de datos

Para interpretar los resultados obtenidos en la presente investigación, se aplicaron métodos estadísticos que permitieron explorar, resumir y modelar los datos recolectados de manera rigurosa y objetiva. El análisis estadístico se organizó en las siguientes etapas:

- Estadística descriptiva: Esta etapa tiene como finalidad ofrecer una visión general de los datos mediante el cálculo de medidas de tendencia central y dispersión. Estos indicadores permitieron caracterizar los principales parámetros operativos involucrados, como la desviación en los taladros, el tipo de explosivo utilizado, el tamaño de fragmentación y el Dig Rate registrado en cada caso.

- Coeficiente de correlación de Pearson: Se utilizaron técnicas para identificar y cuantificar el grado de relación lineal entre dos variables. En este estudio, se evaluó si existe una correlación significativa entre la desviación en la perforación de los taladros, el tipo de explosivo empleado y la calidad de fragmentación, con el Dig Rate de las palas. Este análisis permitió establecer si cambios en las variables del control de calidad afectan directamente el rendimiento de excavación.
- Análisis de varianza: Fueron aplicados para contrastar si existen diferencias estadísticamente significativas en el Dig Rate entre distintos grupos clasificados según los niveles de control de calidad implementados. Por ejemplo, se compararon grupos con alta, media y baja precisión en la perforación, o diferentes tipos de explosivos, para determinar si el rendimiento de excavación presenta variaciones relevantes asociadas a esos factores.

La aplicación combinada de estas herramientas estadísticas aportó una comprensión sólida sobre cómo los elementos del control de calidad en perforación y voladura inciden en el rendimiento de las palas, lo cual resulta fundamental para proponer mejoras sostenibles en la operación minera.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Presentación y análisis de resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del análisis del control de calidad en taladros de producción y su correlación en el Dig Rate de las palas, en una mina ubicada al sur del País.

Se exponen los datos recolectados, su procedimiento y la representación mediante gráficos y tablas que permitan interpretar claramente los resultados.

4.1.1. Comparativa de taladros perforados con coordenadas planeadas por diseño vs coordenadas reales de taladros perforados

La información correspondiente a la malla de perforación, así como las desviaciones entre coordenadas planeadas por diseño y las coordenadas reales de los taladros perforados, se pueden observar en los anexos 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

A continuación, se presenta una tabla de los proyectos a evaluarse con datos específicos de cada uno:

Tabla 13*Tabla Resumen de los Proyectos a Considerarse en el Presente Estudio.*

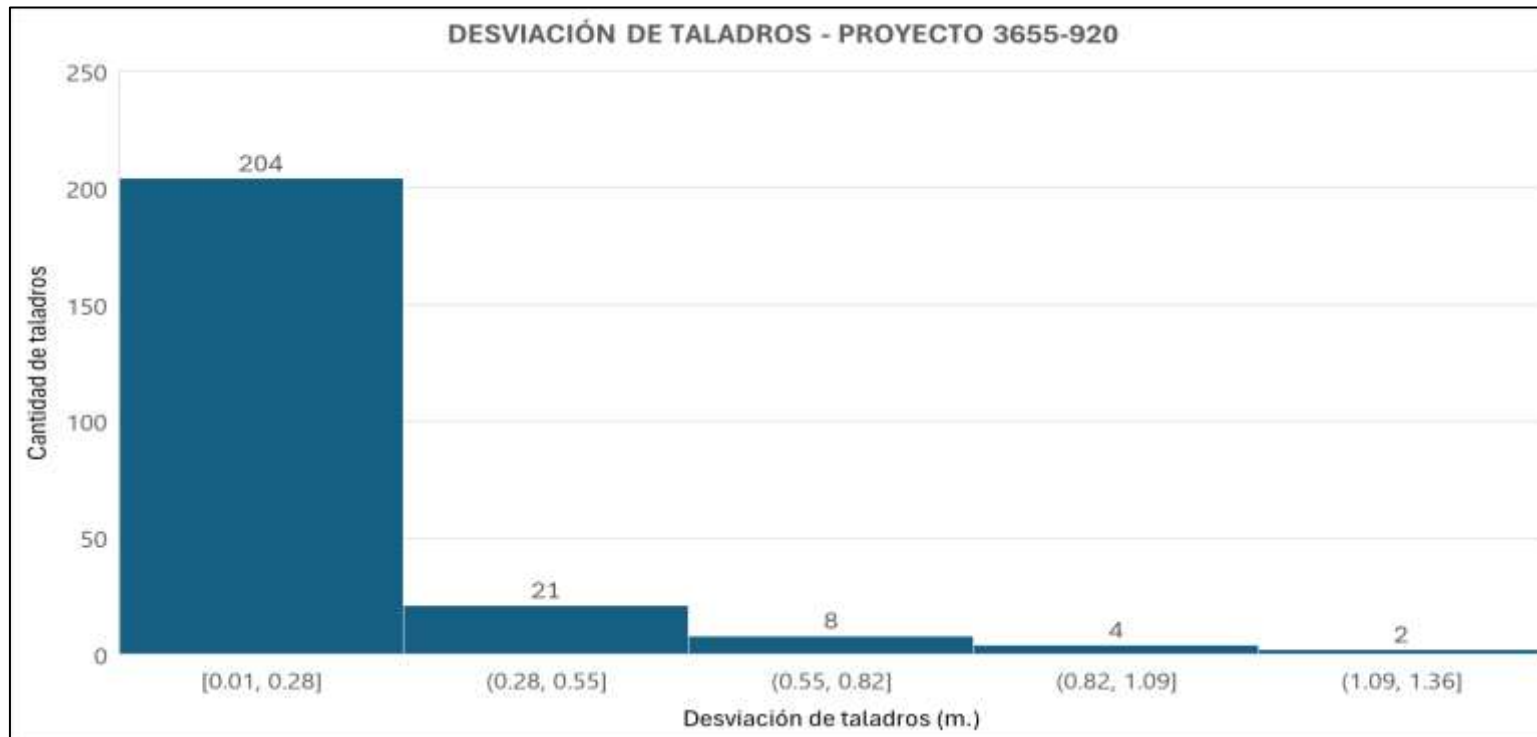
NIVEL	PROYECTO	N° DE TALADROS	DIÁMETRO DE PERFORACIÓN	BURDEN	ESPACIAMIENTO	TONELAJE A DISPARAR
3655	920	296	12 1/4	7	8	556850
3655	921	330	12 1/4	7	8	644619
3655	926	199	12 1/4	7	8	335983
3655	928	214	12 1/4	7	8	418025
3655	927 - 929	425	12 1/4	7	8	780379

4.1.1.1. Cálculo de cantidad de taladros que sobrepasan el límite de desviación

- PROYECTO 3655-920

Figura 17.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-920

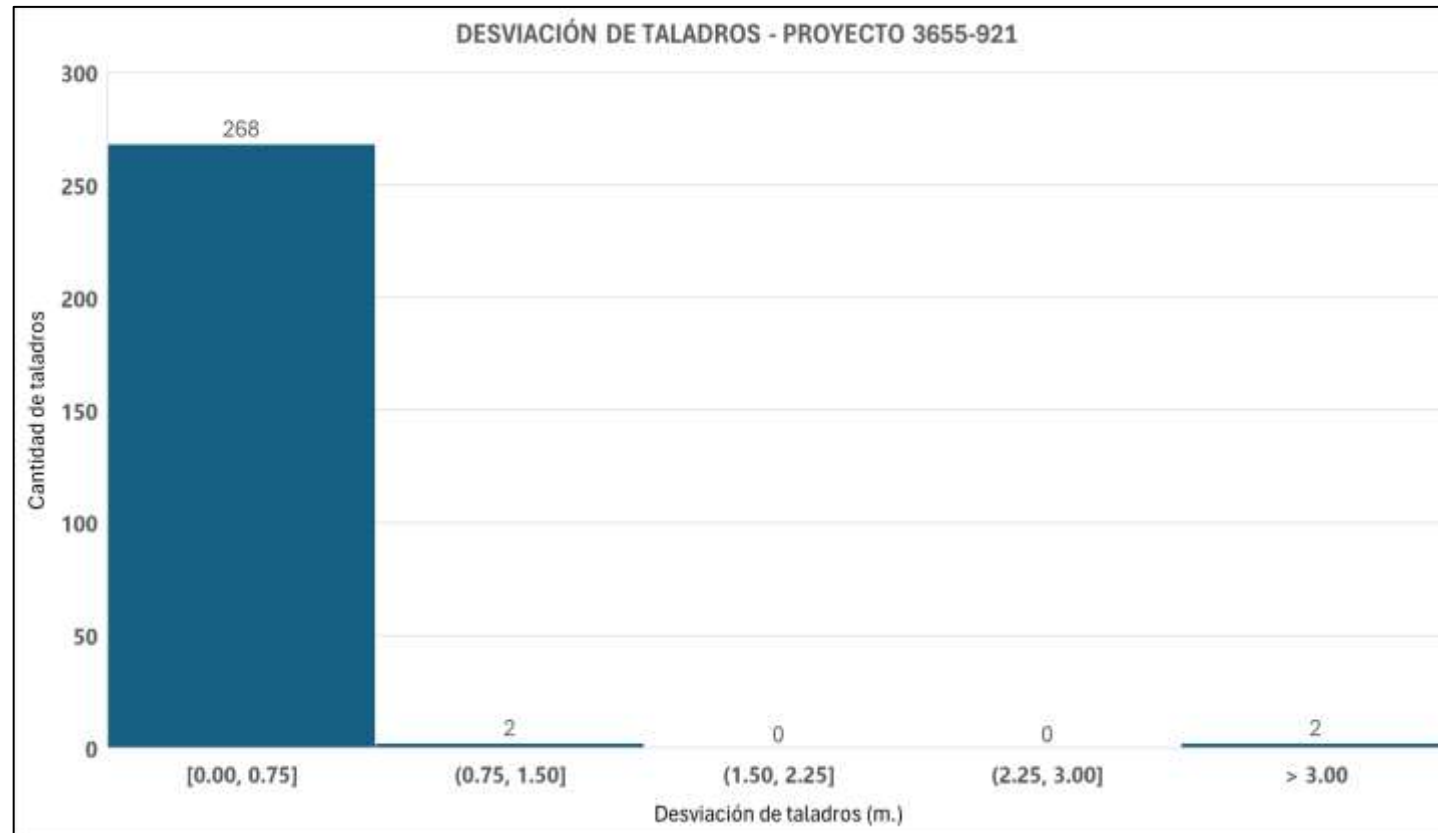


Del total de 296 taladros, se evaluaron 239 durante el periodo de estudio, se identificó que ninguno superó la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,00 % del total de taladros de producción.

- **PROYECTO 3655-921**

Figura 18.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-921



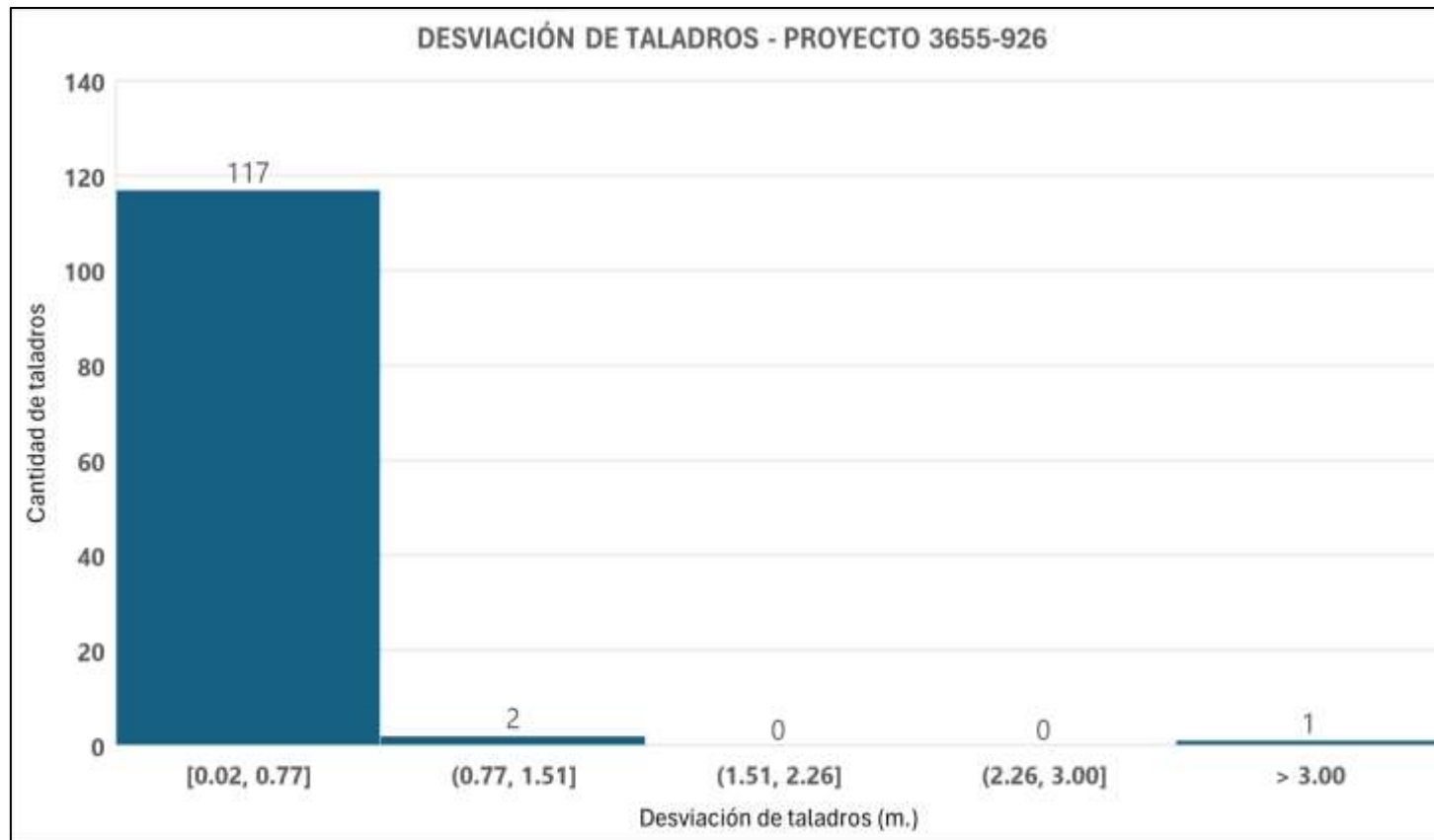
Del total de 330 taladros, se evaluaron 272 durante el periodo de estudio, se identificó que 2 taladros superaron la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,74 % del total de taladros de producción.

Para los cuales es necesario realizar un ajuste en la cantidad de carga explosiva utilizada.

- PROYECTO 3655-926

Figura 19.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-926



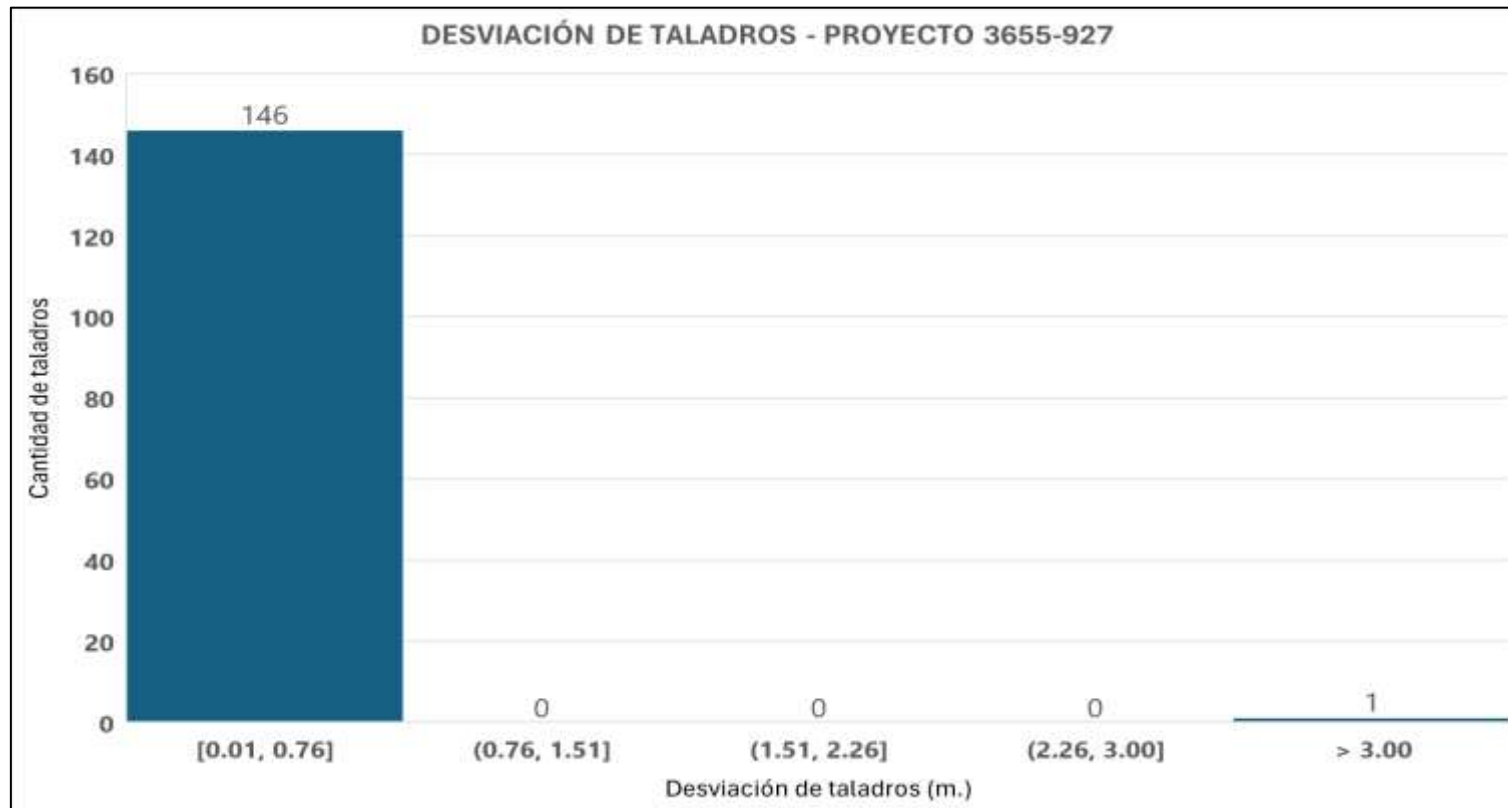
Del total de 199 taladros, se evaluaron 120 durante el periodo de estudio, se identificó que 1 taladro superó la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,83 % del total de taladros de producción.

Para lo cual es necesario realizar un ajuste en la cantidad de carga explosiva utilizada.

- **PROYECTO 3655-927**

Figura 20.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-927



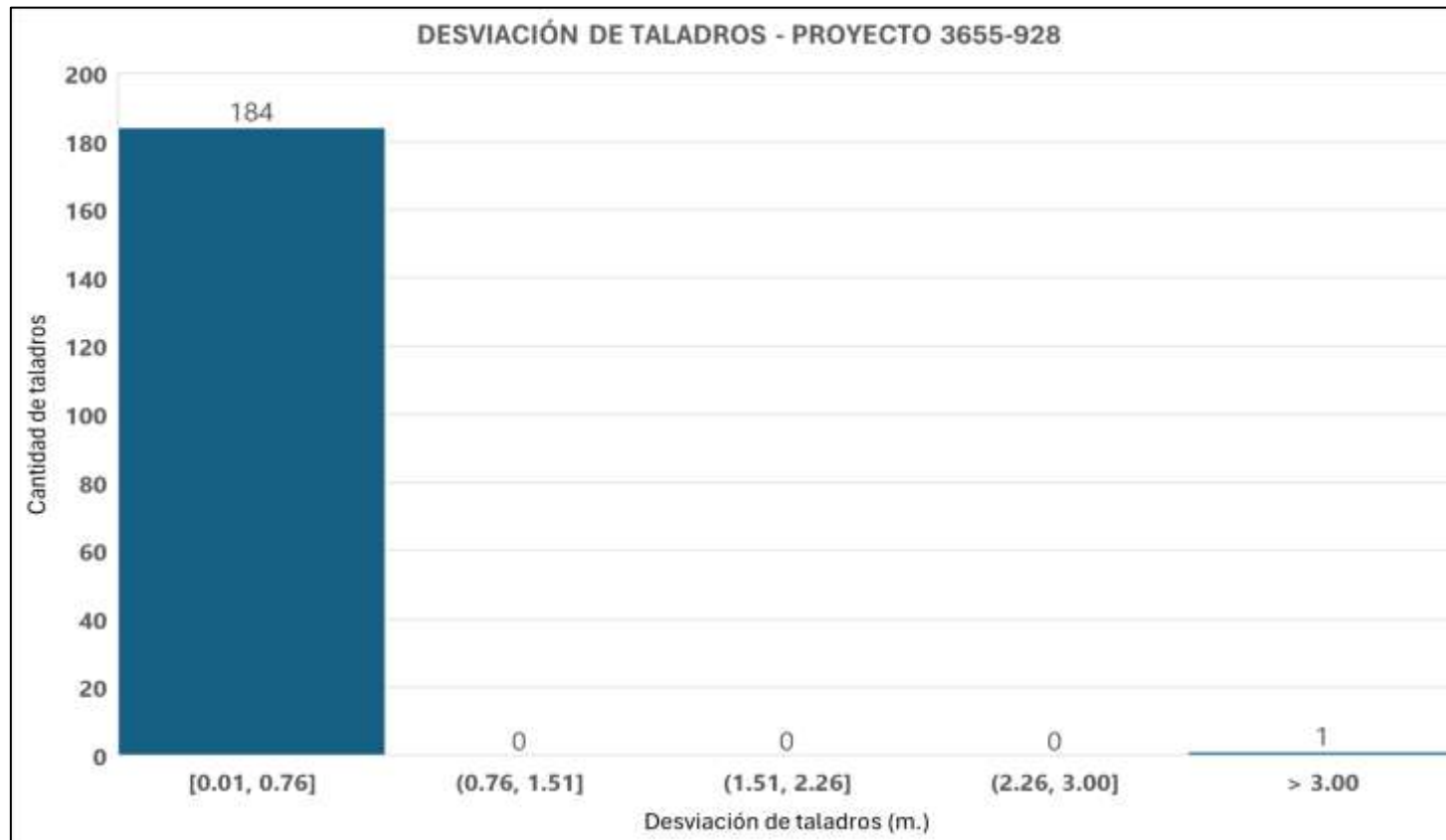
Del total de 175 taladros, se evaluaron 147 durante el periodo de estudio, se identificó que 1 taladro superó la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,68 % del total de taladros de producción.

Para lo cual es necesario realizar un ajuste en la cantidad de carga explosiva utilizada.

- **PROYECTO 3655-928**

Figura 21.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-928



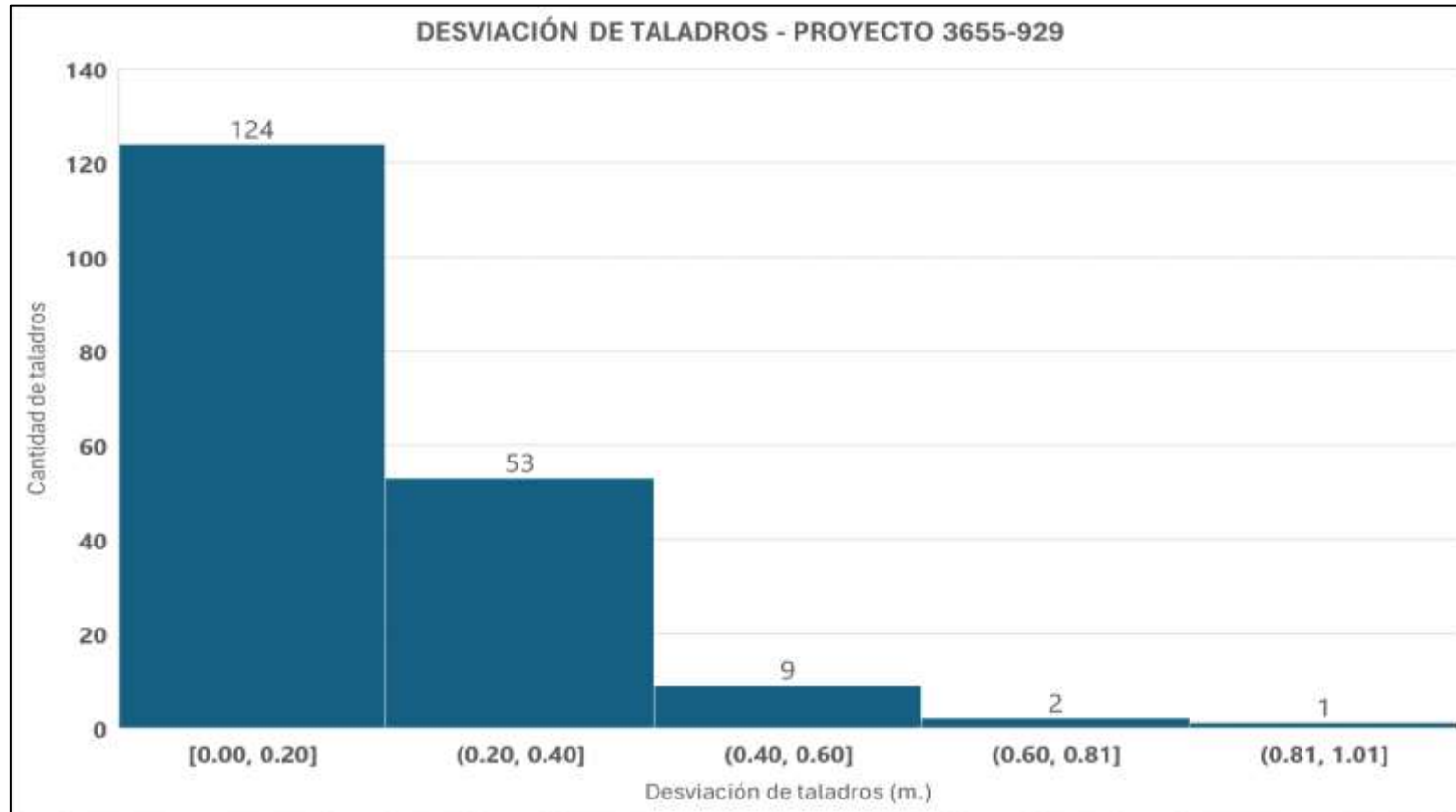
Del total de 214 taladros, se evaluaron 185 durante el periodo de estudio, se identificó que 1 taladro superó la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,54 % del total de taladros de producción.

Para lo cual es necesario realizar un ajuste en la cantidad de carga explosiva utilizada.

- **PROYECTO 3655-929**

Figura 22.

Desviación de Taladros – Proyecto 3655-929



Del total de 250 taladros, se evaluaron 189 durante el periodo de estudio, se identificó que ninguno superó la desviación máxima tolerable. Esto representa un 0,00 % del total de taladros de producción.

Tabla 14

Tabla Resumen de Taladros Desviados

NIVEL	PROYECTO	N° DE TALADROS	N° TALADROS CON DESVIACIÓN > 3.00 m.	% TALADROS CON DESVIACIÓN > 3.00 m.
3655	920	296	0	0.00%
3655	921	330	2	0.74%
3655	926	199	1	0.83%
3655	928	214	1	0.54%
3655	927 - 929	425	1	0.24%

4.1.2. Comparativa de explosivos usados en la unidad de estudio

4.1.2.1. Diseño de taladros para cada proyecto

El diseño asociado a este tipo de explosivo consideró taladros de 12 1/4" de diámetro, con una profundidad de 15 m y una sobre perforación de 1.0 m.

- PROYECTO 3655-920**

Figura 23.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-920

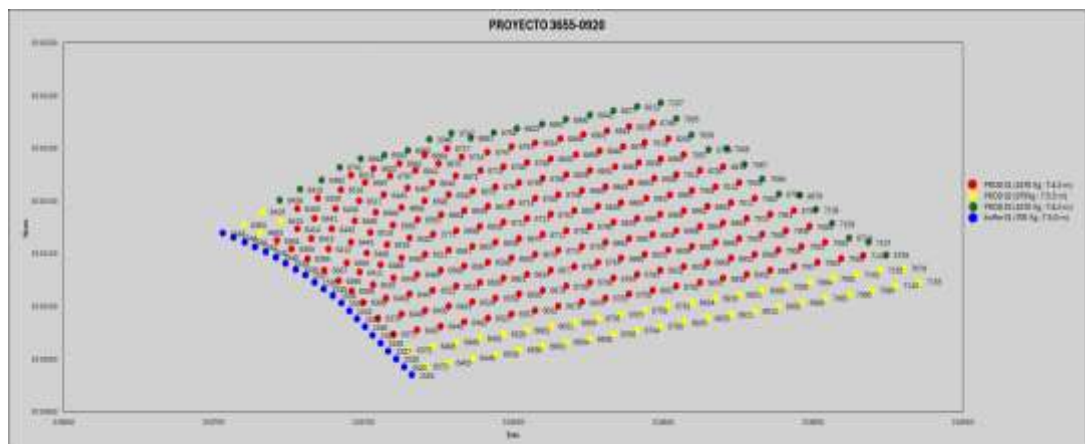
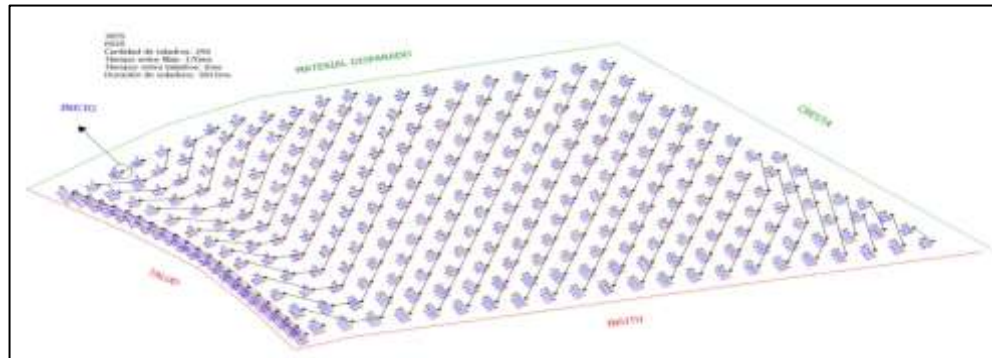


Figura 24.

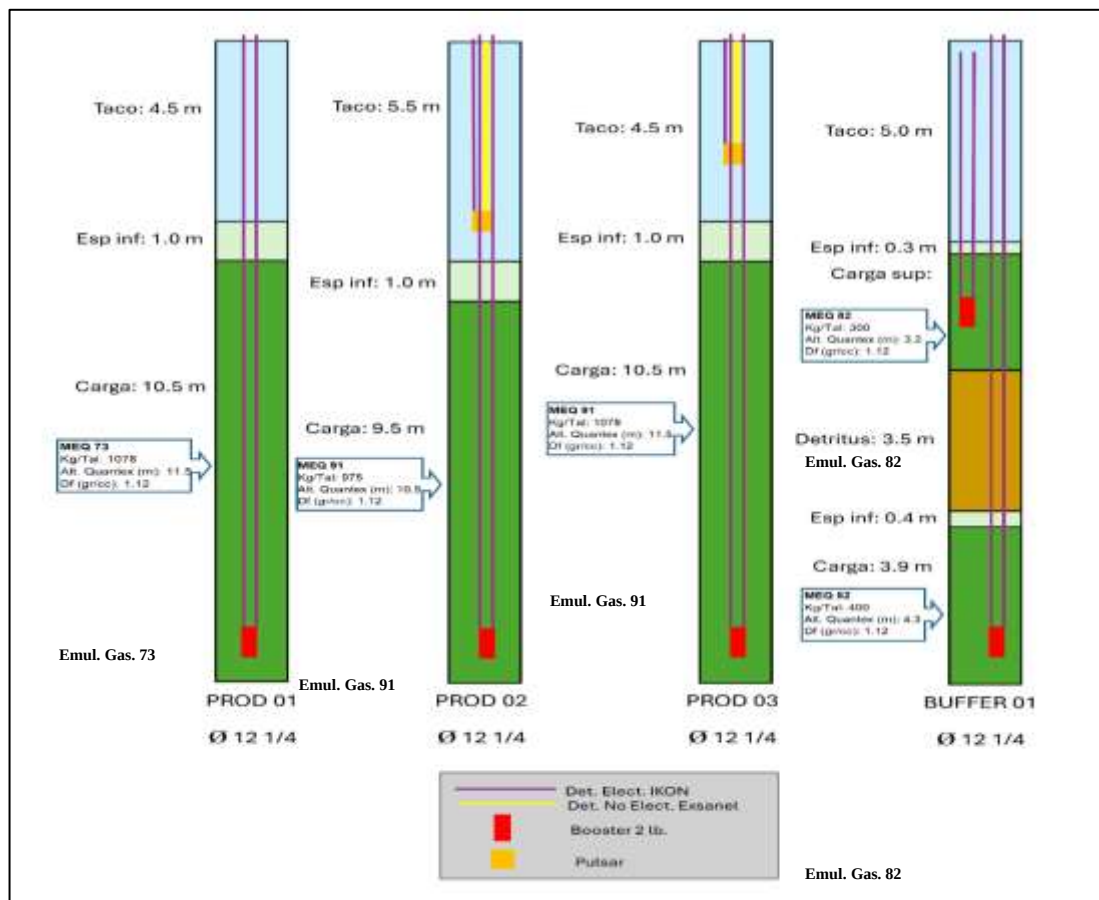
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-920



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-920

Figura 25.

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-920



- **PROYECTO 3655-921**

Figura 26.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-921

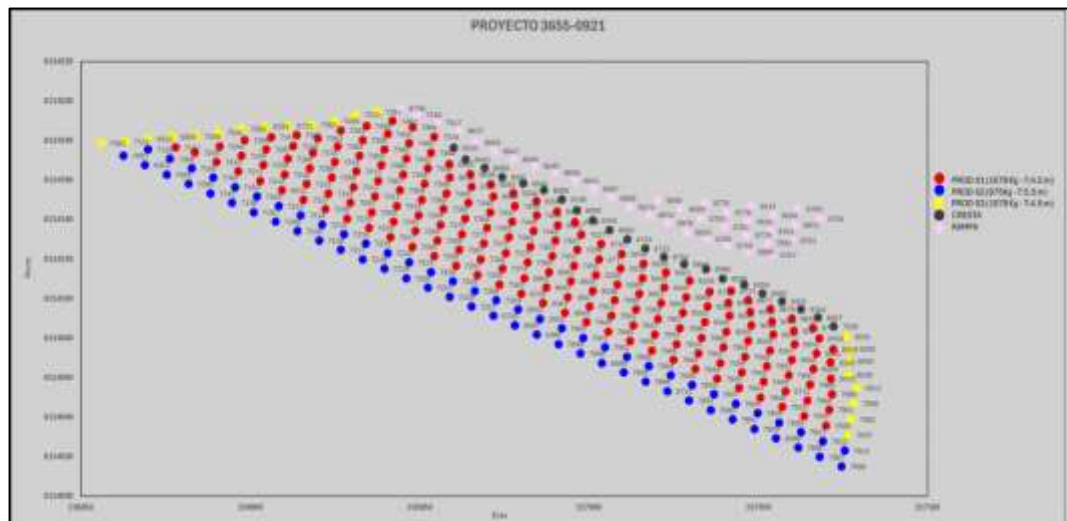
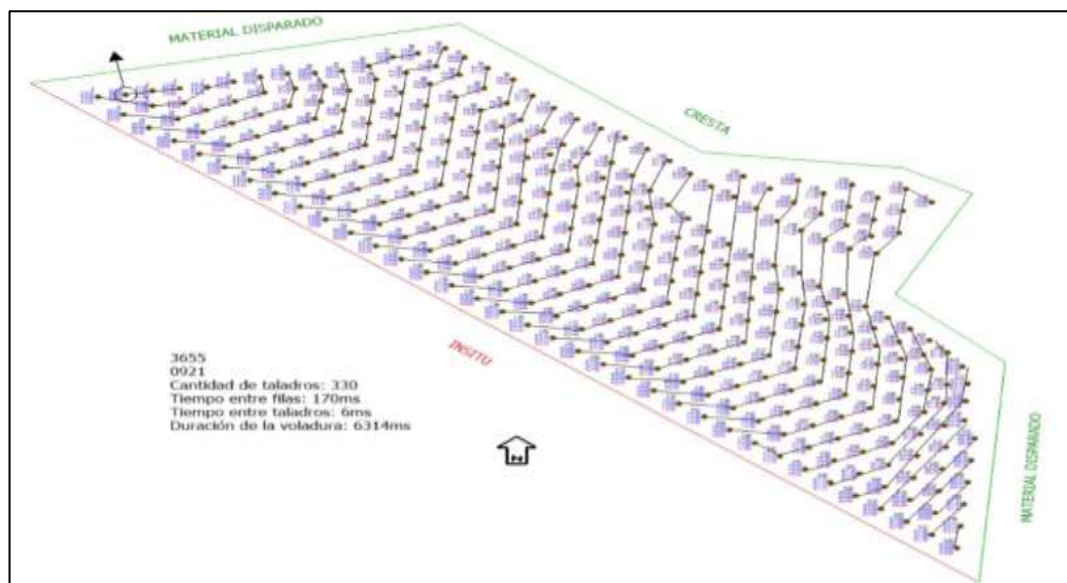


Figura 27.

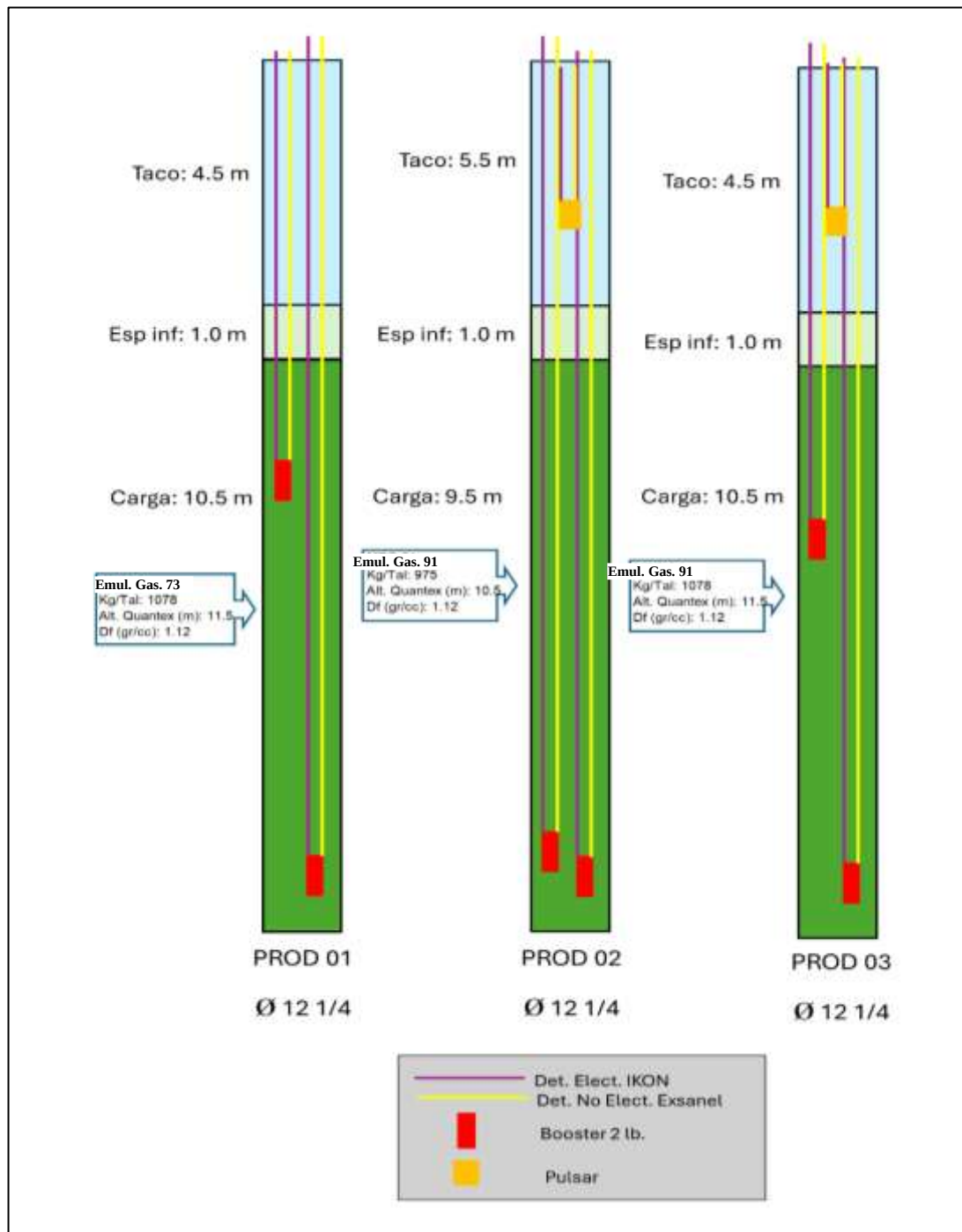
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-921



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-921

Figura 28.

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-921



² "Pulsar" hace referencia al detonador electrónico empleado.

- **PROYECTO 3655-926**

Figura 29.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-926

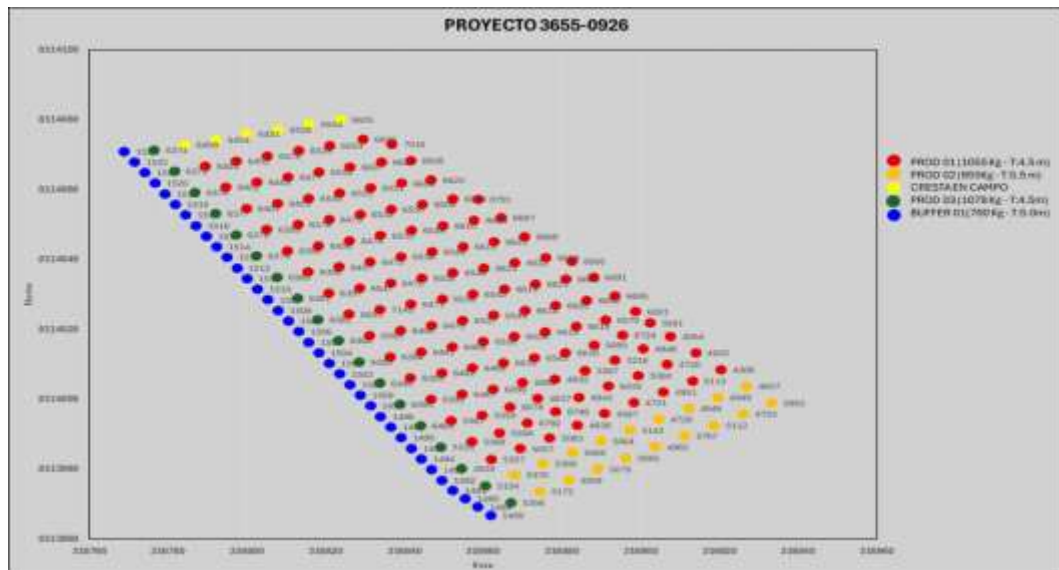
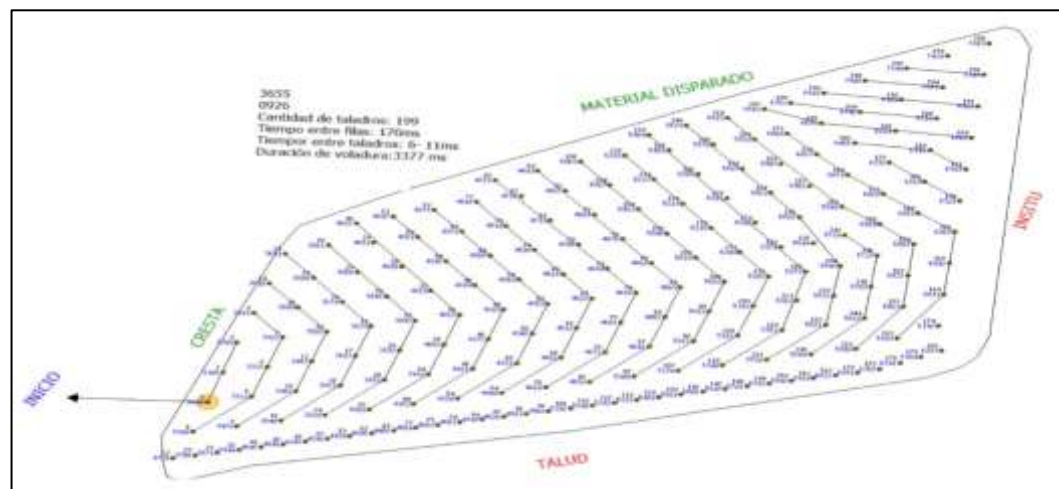


Figura 30.

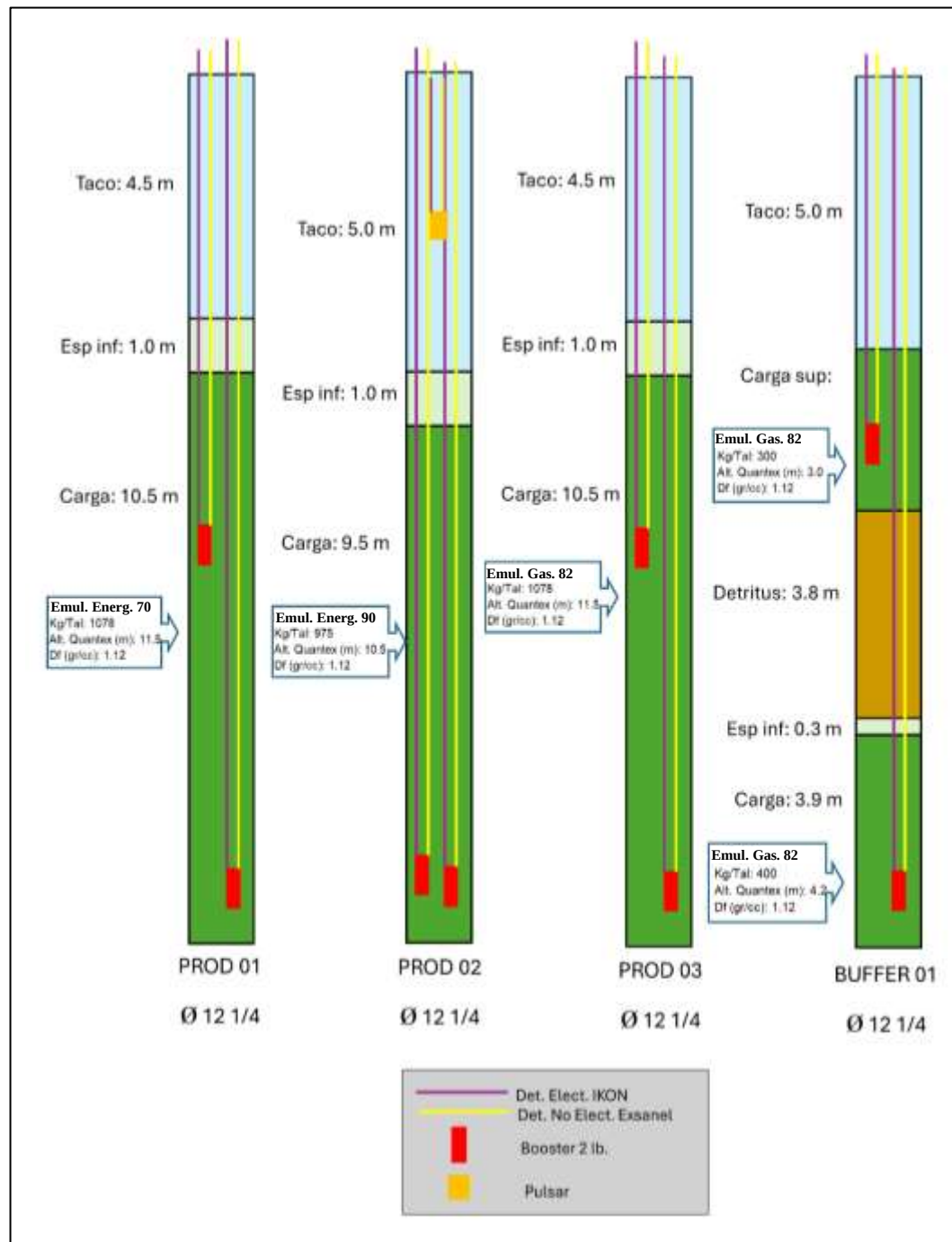
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-926



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-926

Figura 31

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-926



³ “Pulsar” hace referencia al detonador electrónico empleado.

- PROYECTO 3655-927

Figura 32.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-927

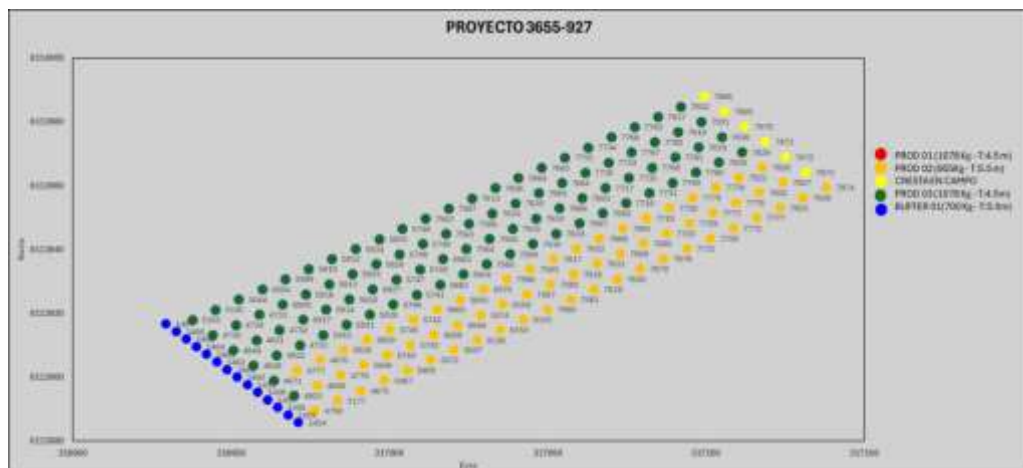
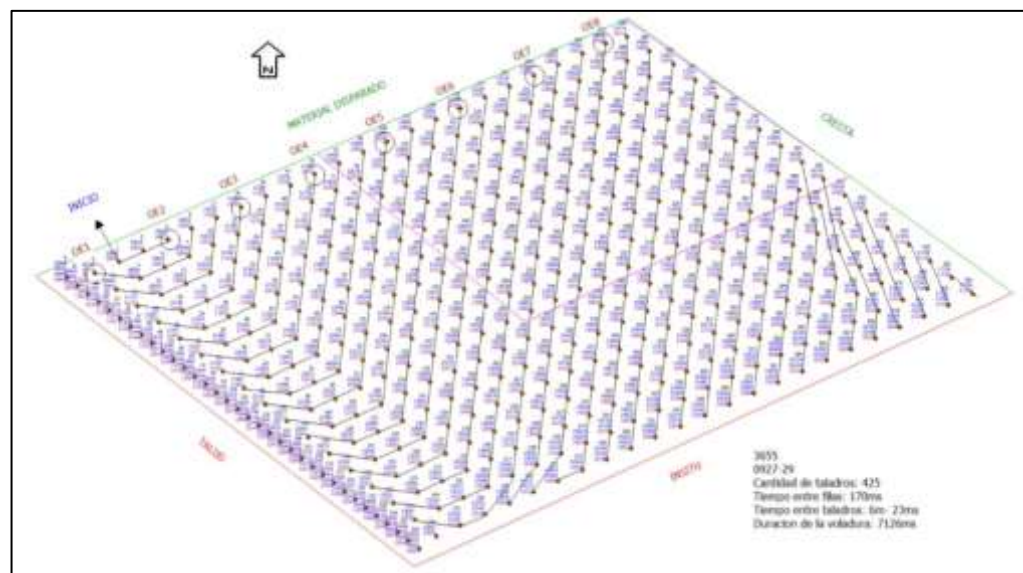


Figura 33.

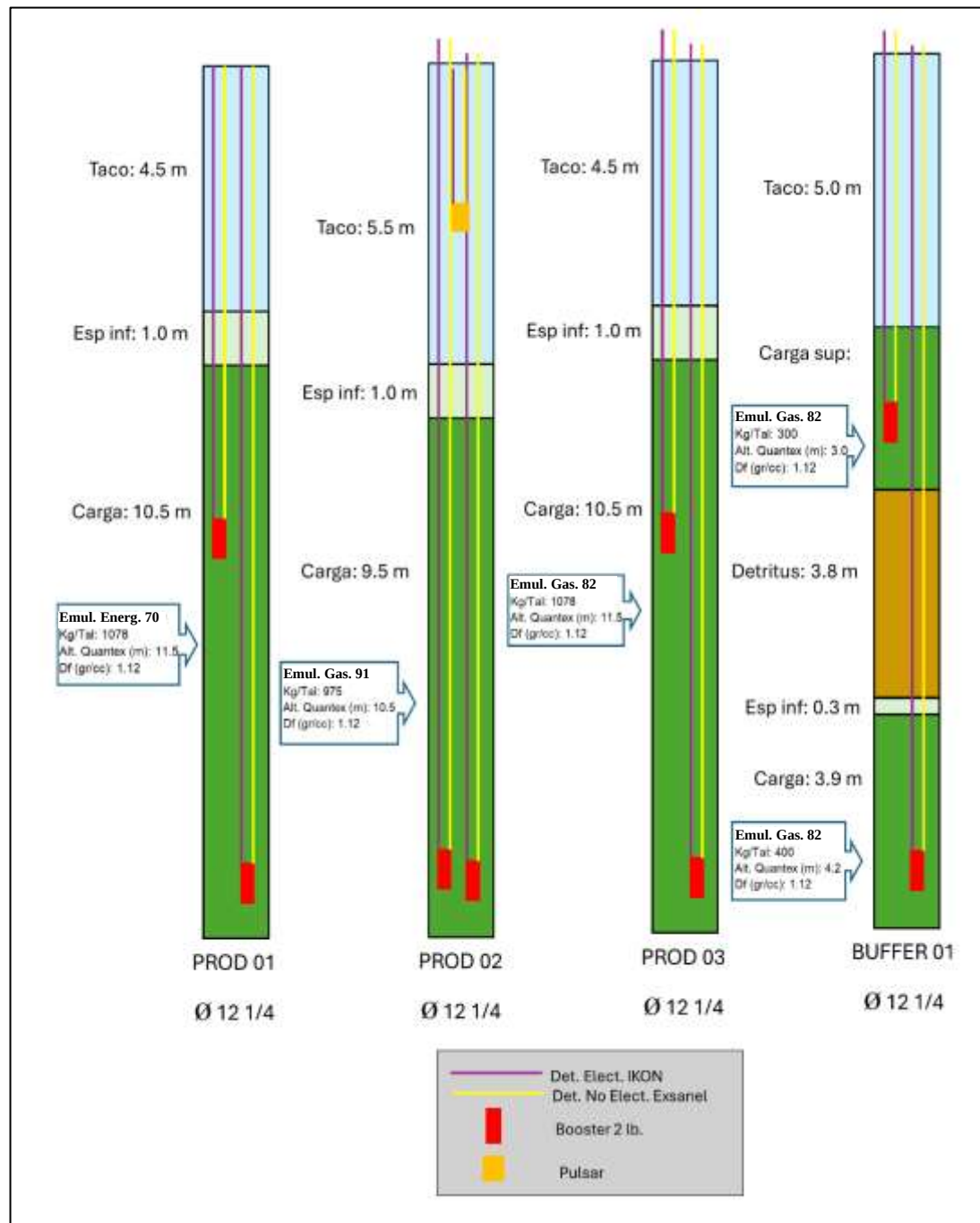
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-927-929



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-927-929

Figura 34.

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-927



⁴ “Pulsar” hace referencia al detonador electrónico empleado.

- **PROYECTO 3655-928**

Figura 35.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-928

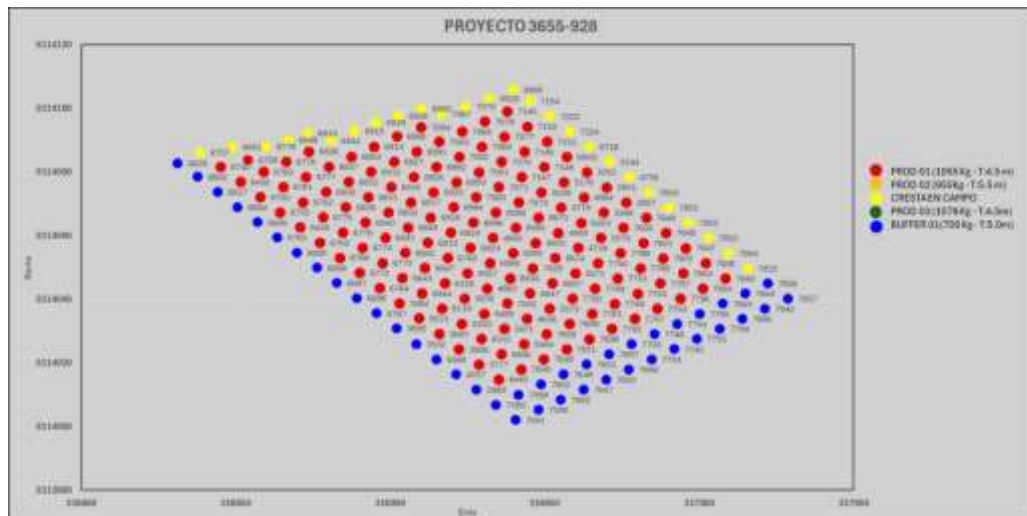
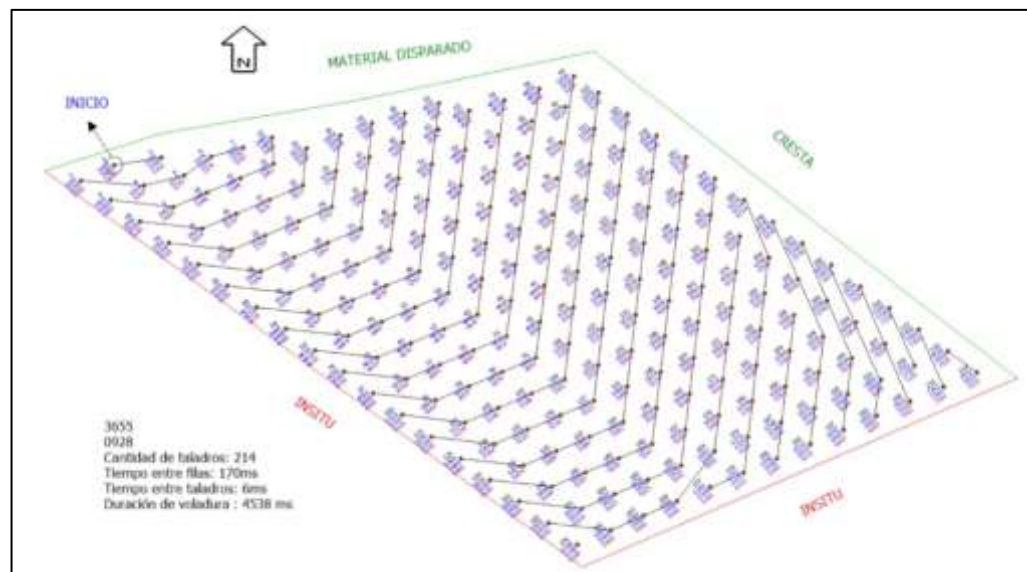


Figura 36.

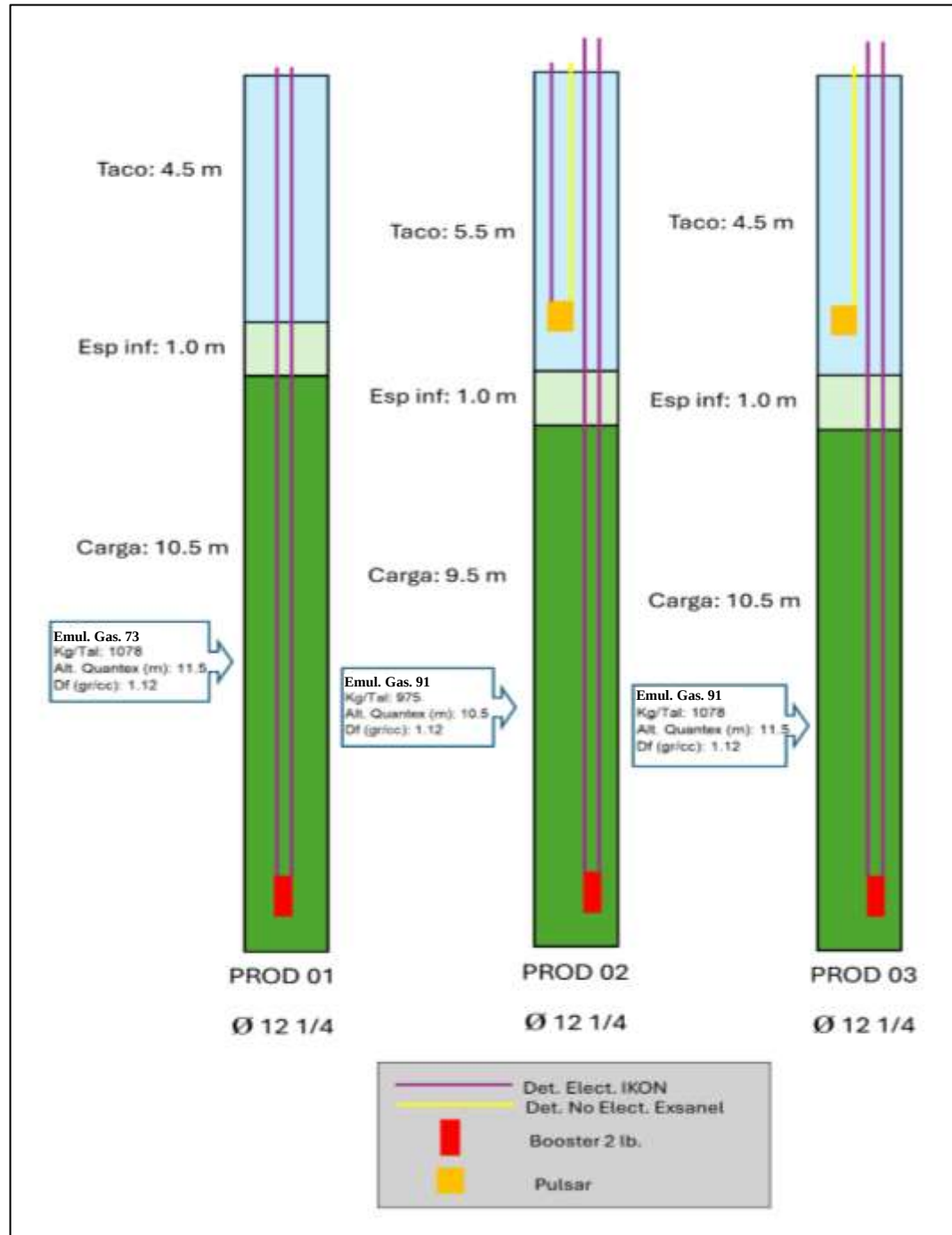
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-928



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-928

Figura 37.

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-928



⁵ “Pulsar” hace referencia al detonador electrónico empleado.

- **PROYECTO 3655-929**

Figura 38.

Plano de Carguío – Proyecto 3655-929

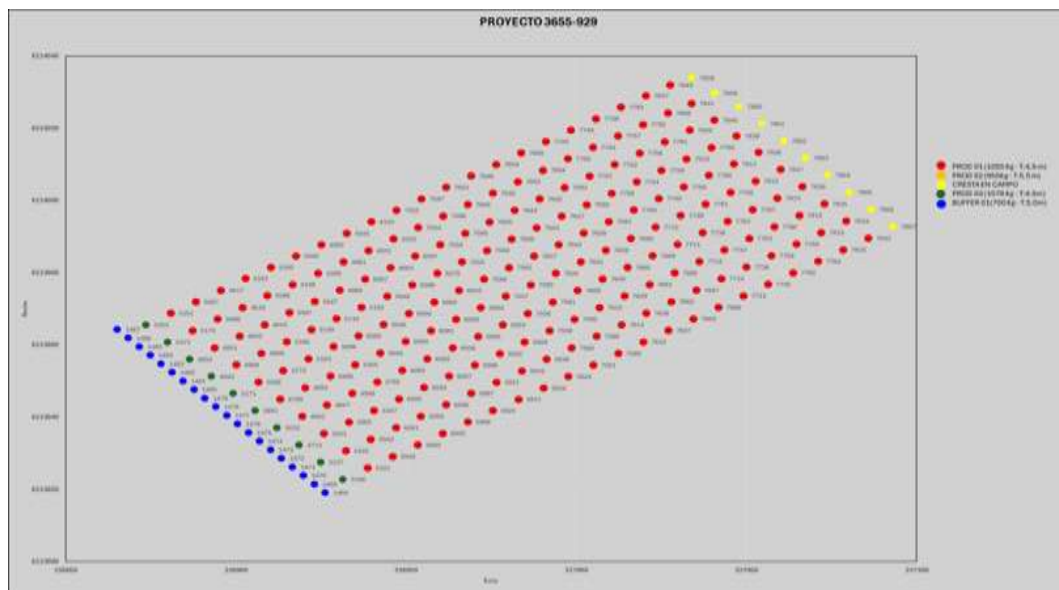
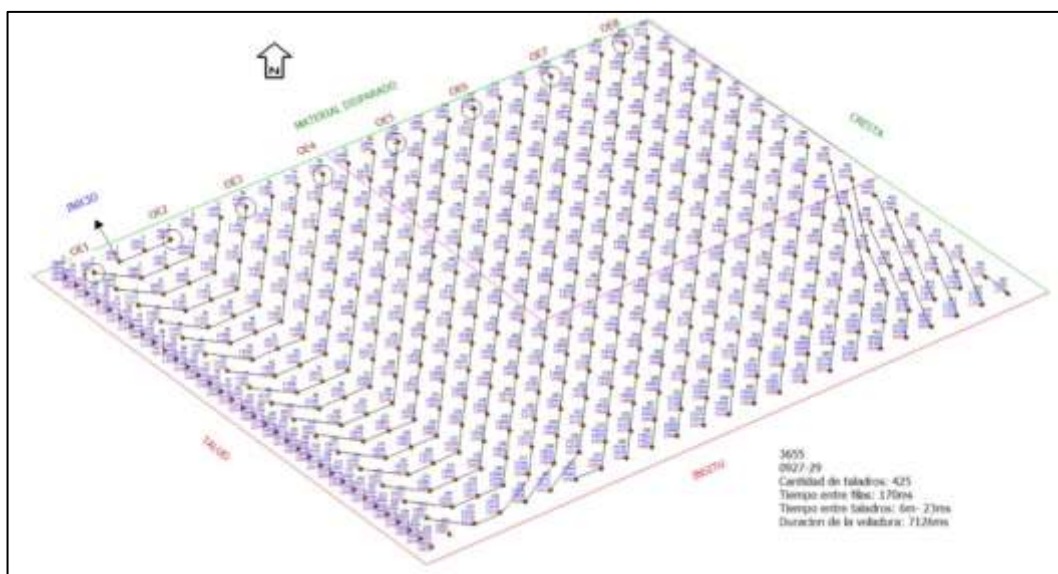


Figura 39.

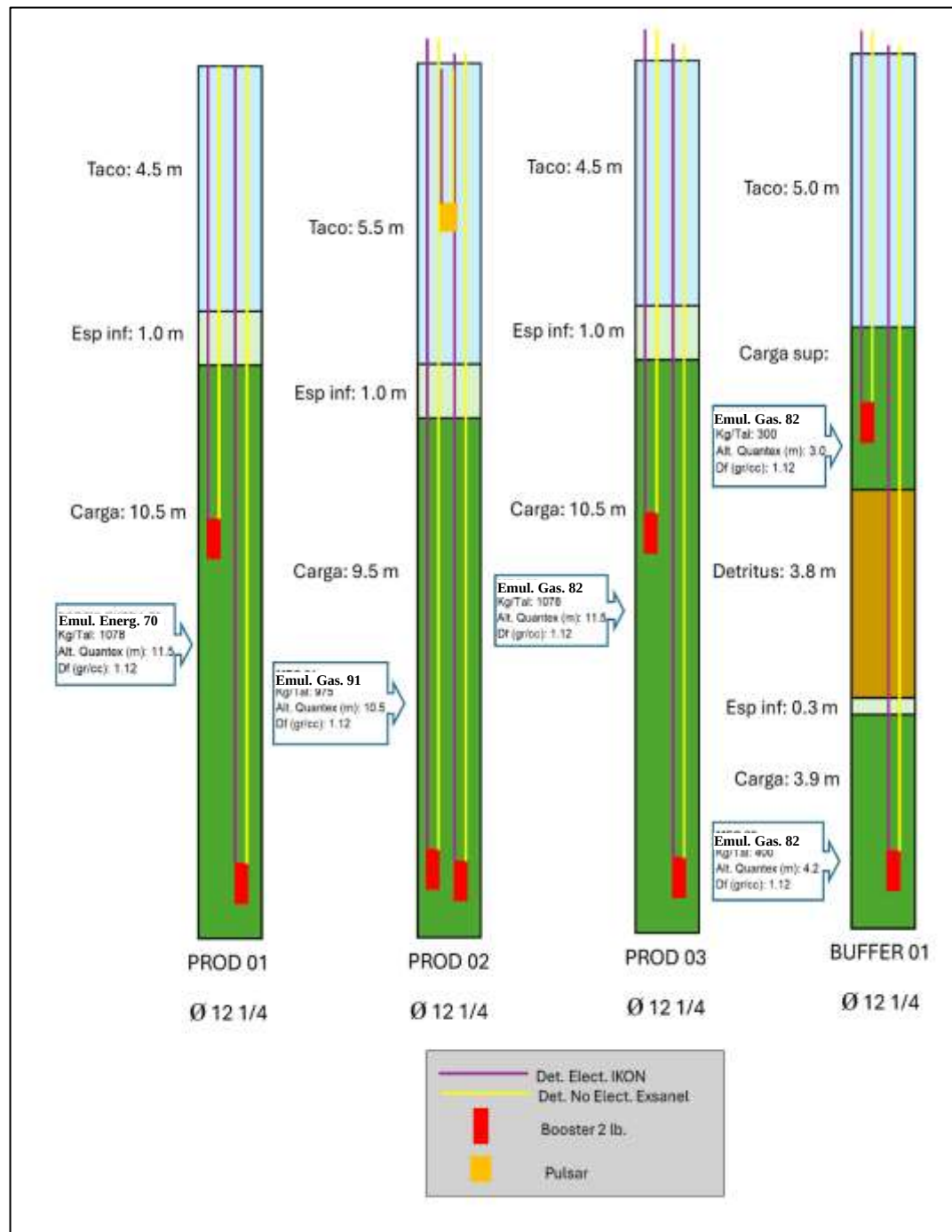
Diseño de Salida de la Malla de Voladura Proyecto 3655-927-929



Nota: Informe de Anteproyecto Proyecto 3655-927-929

Figura 40.

Diseño de Taladros – Proyecto 3655-929



⁶ “Pulsar” hace referencia al detonador electrónico empleado.

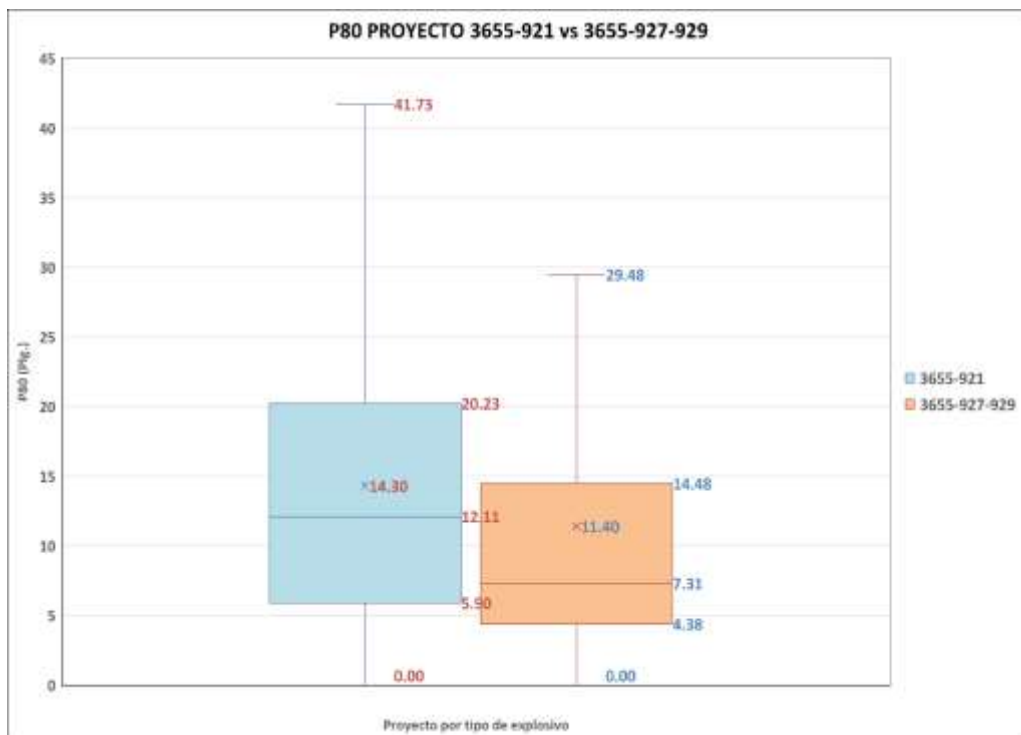
4.1.3. Comparativa de resultados obtenidos post voladura

4.1.3.1. Comparativa de fragmentación obtenida en P80 por tipo de explosivo de cada proyecto

- PROYECTO 3655-921 vs 3655-927-929

Figura 41.

Comparativa Fragmentación P80 Proyecto 3655-921 vs 3655-927-929



Se observó que el uso de Explosivo gasificada logró un P80 promedio de 14.30 pulgadas, mientras que el disparo con Explosivo energético presentó un P80

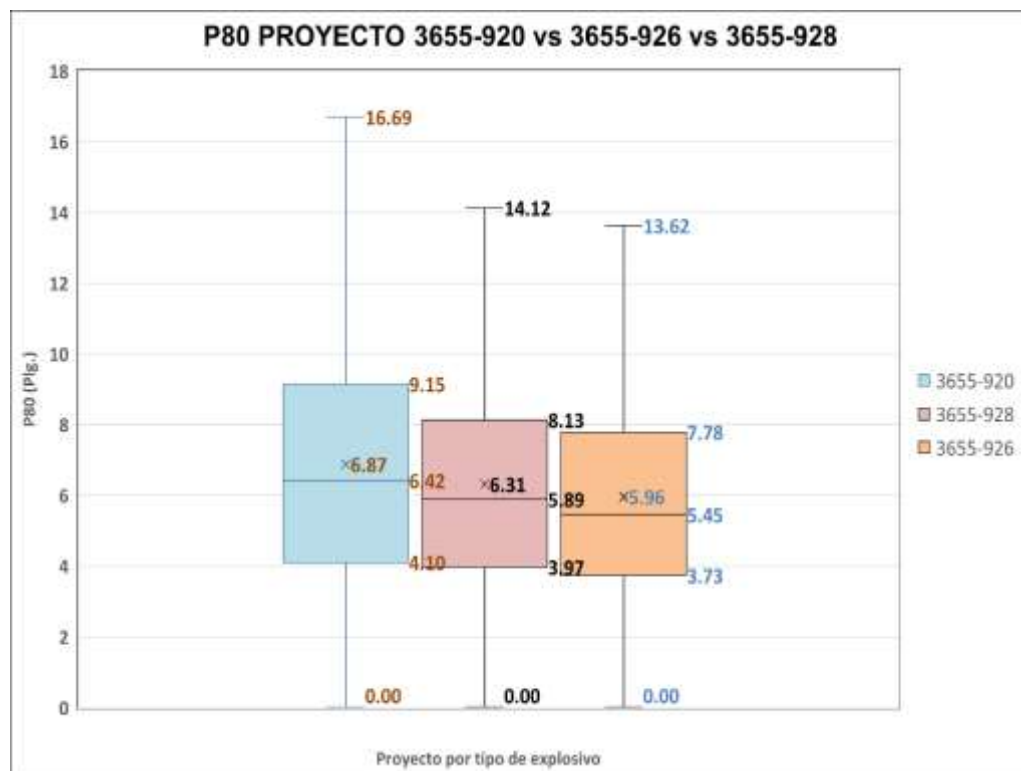
de 11.40 pulgadas, demostrando una mejora sustancial en la fragmentación del macizo rocoso y reduciéndose en 20,27 % con respecto al P80 del proyecto 3655-921.

Así mismo, con el Explosivo energético se obtienen datos con menor dispersión y variabilidad en los resultados.

- **PROYECTO 3655-920 vs 3655-926 vs 3655-928**

Figura 42.

Comparativa Fragmentación P80 Proyecto 3655-920 vs 3655-926 vs 3655-928



Se observó que el uso de Explosivo gasificado usado en los proyectos 3655-920 y 3655-928 se lograron un P80 promedio de 6.87 y 6.31 pulgadas respectivamente, mientras que el disparo con explosivo energético presentó un P80 de 5.96 pulgadas, demostrando una mejora sustancial en la fragmentación del macizo rocoso y reduciéndose en 13,25 % con respecto al P80 del proyecto 3655-920 y 5,55 % con respecto al P80 del proyecto 3655-928.

Así mismo, con el Explosivo energético se obtienen datos con menor dispersión y variabilidad en los resultados.

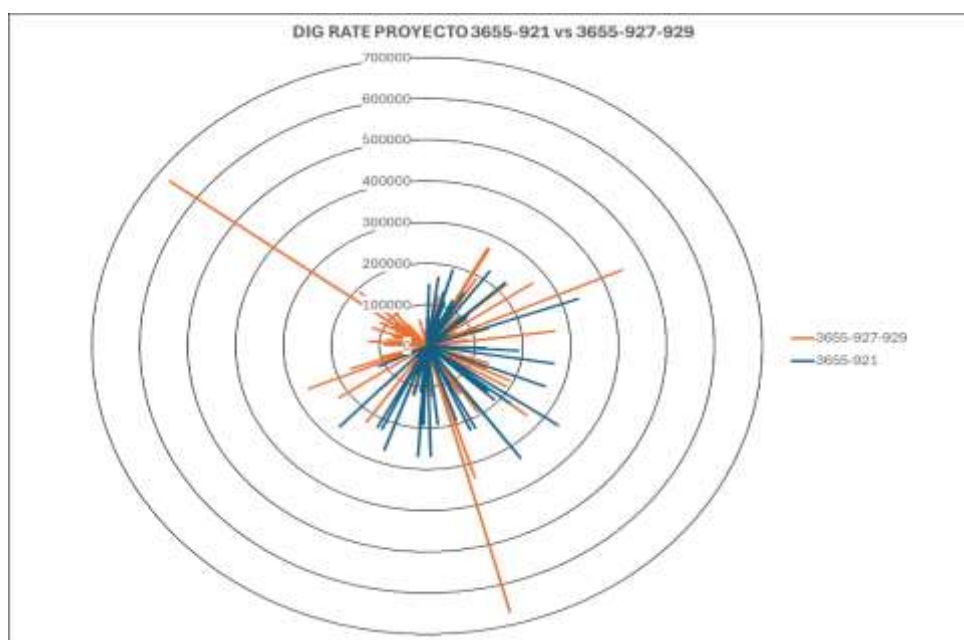
4.1.3.2. Comparativa del Dig Rate obtenido en cada proyecto

El Dig Rate, entendido como la velocidad de excavación expresada en toneladas por hora, es un indicador clave para evaluar la eficiencia del proceso de carguío luego de la voladura. En este análisis, se compararon los valores obtenidos en distintos proyectos dentro de la unidad minera de estudio.

- **PROYECTO 3655-921 vs 3655-927-929**

Figura 43.

Comparativa del Dig Rate Proyecto 3655-921 vs 3655-927-929

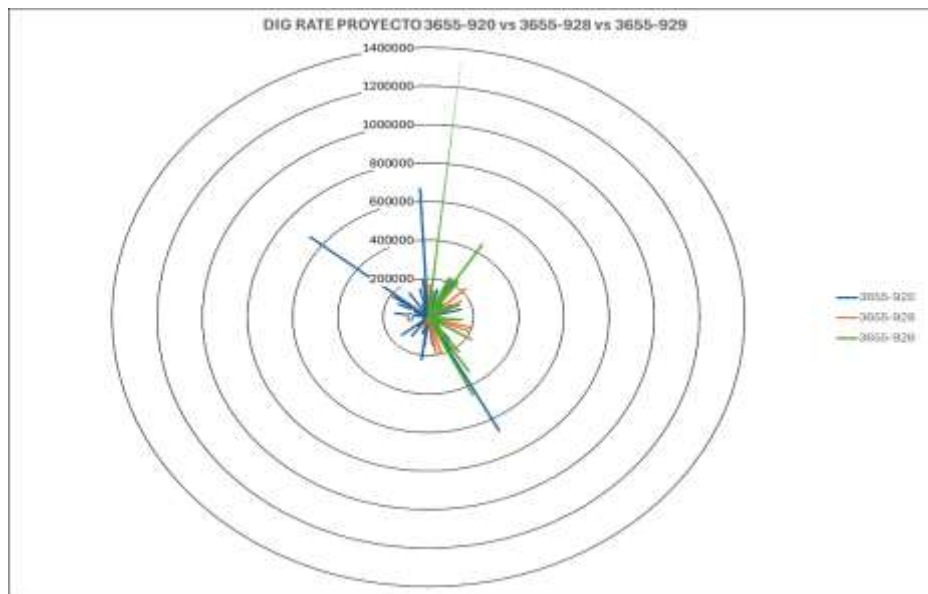


Los resultados revelan diferencias marcadas entre proyectos. En aquellos donde se utilizó el Explosivo energético (Proyecto 3655-927-929), al comparar los radios de los proyectos se evidenció una mejora en el rendimiento de las palas en un 20,03 %, alcanzando mayores tasas de excavación. Por otro lado, en los proyectos donde se empleó Explosivo gasificado, los valores de Dig Rate fueron más variables y, en algunos casos, inferiores, lo que podría estar vinculado a una fragmentación menos uniforme o mayores desviaciones en la malla de perforación.

- **PROYECTO 3655-920 vs 3655-926 vs 3655-928**

Figura 44.

Comparativa del Dig Rate Proyecto 3655-920 vs 3655-926 vs 3655-928



Los resultados obtenidos muestran contrastes significativos entre los distintos proyectos. En los que se aplicó el Explosivo energético (Proyecto 3655-926), la comparación de los radios evidenció una mejora en la eficiencia de las palas en un 26,22 %, reflejada en un aumento en las tasas de excavación. En contraste, los proyectos que utilizaron Explosivo gasificado presentaron una mayor variabilidad en el Dig Rate e incluso valores más bajos en algunos escenarios, lo que podría estar asociado a una fragmentación menos homogénea o a desviaciones en la configuración de la malla de perforación.

Estas variaciones permiten identificar oportunidades de mejora en el control de calidad de la perforación y la selección del tipo de explosivo, orientando las decisiones hacia una mayor eficiencia del ciclo mina.

4.1.3.3. Velocidad de excavación vs Fragmentación P80

El análisis correlacional entre la velocidad de excavación y el P80

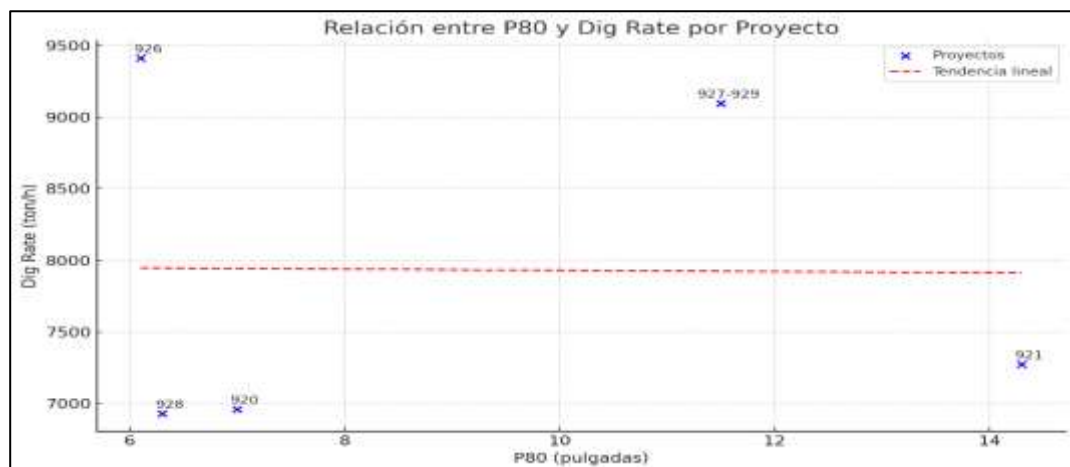
Tabla 15

Tabla Comparativo Dig Rate vs Fragmentación P80

PROYECTO	POLIGONO	EXPLOSIVO	P80	DIG RATE
3655-0926	3655-943W	EMULSION ENERGÉTICA	5.9582	9412.786894
3655-0928	3655-942W	EMULSION GASIFICADO	6.3114	6929.685574
3655-0920	3655-941W	EMULSION GASIFICADO	6.8744	6960.168211
3655-927-929	3655-944W	EMULSION ENERGÉTICA	11.4044	9095.594721
3655-921	3655-940W	EMULSION GASIFICADO	14.2954	7273.446401

Figura 45

Comparativa entre Dig Rate vs Fragmentación P80



Se observa que la fragmentación medida en P80, reduciéndose en un 18,00 %, y el Dig Rate, incrementándose en un 23,13 %, son datos inversamente proporcionales, puesto que, al disminuir el tamaño de fragmentación en P80 el Dig Rate tiende a incrementar y viceversa.

Lo que nos indica que la fragmentación medida en P80 afecta directamente al Dig Rate de las palas de una mina ubicada al sur del País, ya que un P80 inferior permite alcanzar velocidades de excavación superiores, optimizando el rendimiento de las palas.

Asimismo, se calcula el tiempo por cucharón que la pala ocupa de carguío al volquete, observándose que este tiempo es menor en los proyectos donde se utilizó explosivo energético.

Tabla 16

Tabla Tonelaje y Tiempo por Cucharón

PROYECTO	N° PASES TOTAL	TIEMPO TOTAL CARGUÍO (Seg.)	TONELAJE MINADO	TONELAJE POR CUCHARON	TIEMPO POR CUCHARON (Seg.)
3655-926	3575	109875	287286.1	80.35974825	30.73426573
3655-928	5738	226126	435272.8	75.85792959	39.40850471
3655-920	7578	289637	559978.4	73.8952758	38.22077065
3655-927-929	8592	273826	691836.2	80.520973	31.86987896
3655-921	5796	215741	435883.5	75.20419255	37.22239476

Este resultado se debe a que la fragmentación alcanzada, expresada en el valor de P80, fue menor en comparación con los proyectos que emplearon explosivo gasificado. Una mejor fragmentación permitió reducir el esfuerzo de excavación y optimizar la capacidad de llenado de cada cucharón, incrementando así la eficiencia del proceso de carguío.

4.1.4. Análisis de costos

En esta sección se presenta la evaluación comparativa de los costos asociados a dos tipos de explosivos utilizados en la unidad minera: Emulsión Gasificada y Emulsión Energética. El análisis considera los principales componentes que intervienen en el costo unitario por tonelada: perforación, accesorios y explosivo. Los resultados se detallan en la siguiente tabla:

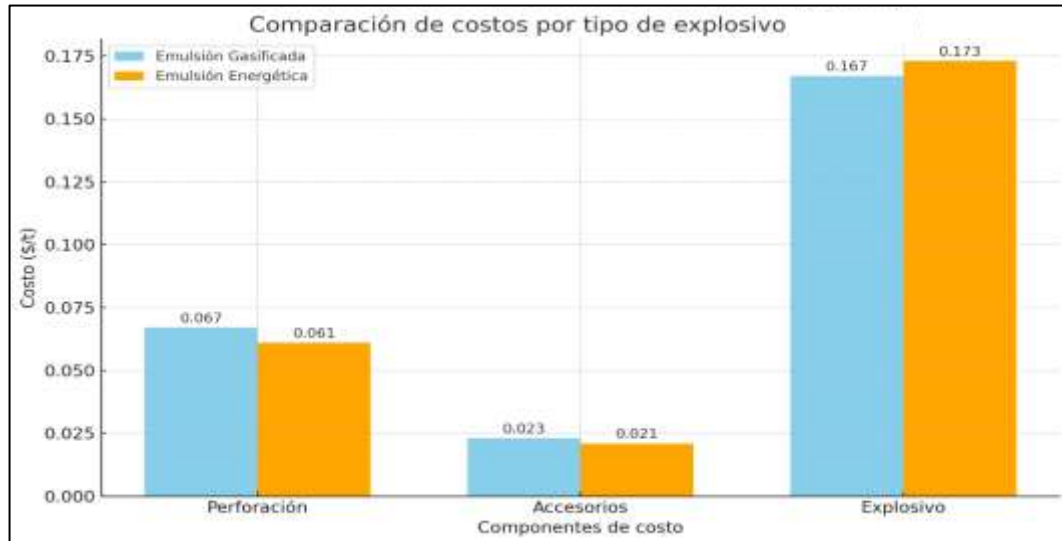
Tabla 17

Comparación de Costos por Tipo de Explosivo

ITEM	UNIDAD	EMULSION GASIFICADA	EMULSION ENERGÉTICA
Costo de perforación		0.067	0.061
Costo de accesorios	\$/t	0.023	0.021
Costo de explosivo		0.167	0.173
Costo Total (\$)		0.257	0.255
Ahorro total (\$)			0.002

Figura 46.

Comparación de Costos por Tipo de Explosivo



En la Figura 16, la Emulsión Energética presenta un costo ligeramente superior en el rubro de explosivos, muestra un ahorro general de USD 0.002 por tonelada gracias a menores costos en perforación y accesorios.

A continuación, se muestra el impacto económico total al aplicar Emulsión Energética en cada uno de los proyectos evaluados:

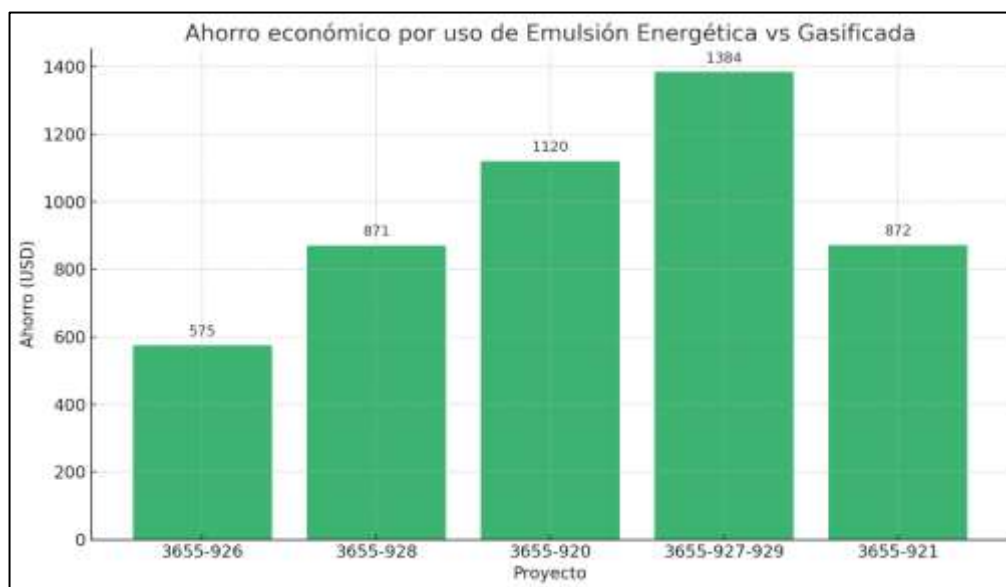
Tabla 18

Ahorro por Tipo de Explosivo

Proyecto	Tonelaje Minado (t)	Costo Emulsión Gasificada	Costo Emulsion Energética	Ahorro (\$)
3655-926	287286.1	73832.5277	73257.9555	574.5722
3655-928	435272.8	111865.1096	110994.564	870.5456
3655-920	559978.4	143914.4488	142794.492	1119.9568
3655-927-929	691836.2	177801.9034	176418.231	1383.6724
3655-921	435883.5	112022.0595	111150.2925	871.767
TOTAL	-	-	-	4820.514

Figura 47.

Ahorro Económico por Proyecto



En el gráfico, se representa el ahorro económico generado por el uso de Emulsión Energética frente a Emulsión Gasificada, considerando el tonelaje minado en cada proyecto. Se observa que los proyectos, en donde se usó la Emulsión Energética, como el 3655-927-929, reportan un mayor beneficio económico, superando los USD 1,380 de ahorro y el proyecto 3655-926 muestran un ahorro más discreto, pero igualmente relevante dentro del contexto operativo. En el caso del resto de los proyectos, se utilizó Emulsión Gasificada. No obstante, si se hubiera optado por el uso de Emulsión Energética, el ahorro estimado habría alcanzado los USD 2,862.27, considerando los volúmenes operativos registrados.

Este análisis gráfico refuerza que, aun con diferencias mínimas en el costo por tonelada (USD 0.002), el impacto acumulado a gran escala representa un

beneficio económico sustancial, lo que valida la elección de Emulsión Energética como una alternativa técnicamente viable y económicamente eficiente para operaciones sostenidas de mediana y gran escala.

4.1.4.1. Costo por cucharón de pala

- Costo por tonelada:
 - Emulsión Gasificada: USD 0.257
 - Emulsión Energética: USD 0.255
- Capacidad del cucharón: 25 toneladas

Cálculo del costo por cucharón

- Para Emulsión Gasificada:
 - Costo por cucharón = $0.257 \times 25 = USD\ 6.43$
- Para Emulsión Energética:
 - Costo por cucharón = $0.255 \times 25 = USD\ 6.38$

Tabla 19

Tabla Comparativo de costos

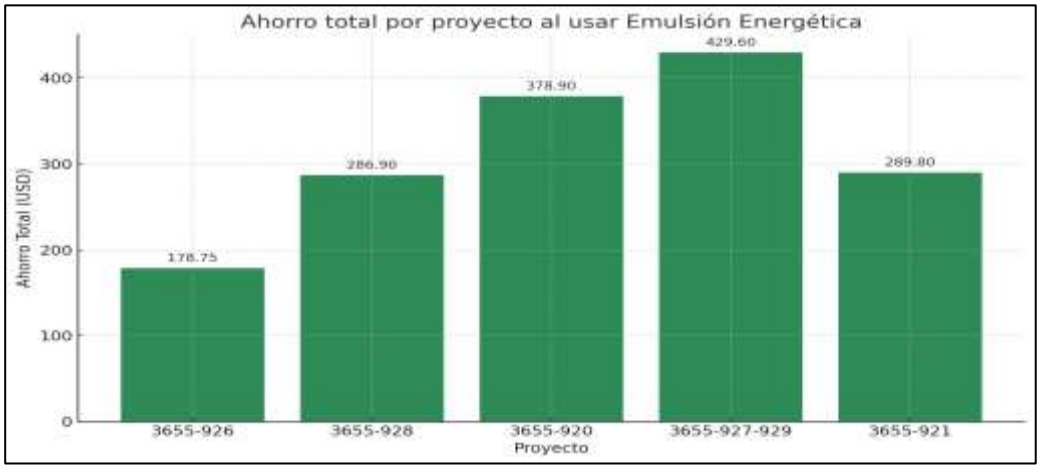
Tipo de Emulsión	Costo por cucharón (USD)
Gasificada	6.43
Energética	6.38
Ahorro por cucharón	0.05

Considerando una capacidad operativa de 25 toneladas por cucharón, el costo por pase de pala asciende a USD 6.43 al utilizar Emulsión Gasificada, mientras que con Emulsión Energética se reduce ligeramente a USD 6.38. Esto representa un ahorro de USD 0.05 por cucharón. Aunque la diferencia por pase es reducida, al proyectarse sobre cientos de ciclos diarios, el impacto económico acumulado resulta significativo

Tabla 20
Ahorro Total por Proyecto

Proyecto	N° Pases Total	Ahorro por Cucharón (USD)	Ahorro Total (USD)
3655-926	3,575	0.05	178.75
3655-928	5,738	0.05	286.9
3655-920	7,578	0.05	378.9
3655-927-929	8,592	0.05	429.6
3655-921	5,796	0.05	289.8

Figura 48.
Ahorro por N° de Cucharones de cada Proyecto



La Figura 48, evidencia el efecto económico que implica la selección del tipo de emulsión, tomando en cuenta la cantidad total de pases de pala ejecutados en cada proyecto. Aunque el ahorro por cucharón, equivalente a USD 0.05, puede parecer reducido de forma individual, su impacto se vuelve significativo al aplicarse sobre altos volúmenes de operación. Esta diferencia contribuye directamente a la reducción de costos en las etapas de voladura y carguío.

Asimismo, este tipo de optimización puede generar beneficios adicionales, tales como menor desgaste en los equipos, mejor aprovechamiento de los recursos y reducción en los tiempos operativos.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación refuerzan la importancia del control de calidad en los procesos de perforación, especialmente por su influencia directa en la fragmentación del macizo rocoso y en la eficiencia del proceso de carguío. Al analizar seis proyectos operativos, se identificó que los taladros con desviaciones superiores a los 3.00 metros presentaban una distribución irregular de la energía explosiva, lo cual se tradujo en un incremento del P80 y una reducción significativa del Dig Rate, en comparación con los taladros dentro del rango tolerable.

Este comportamiento coincide con lo documentado por Nieto (2021), quien en su estudio sobre desviaciones en perforación concluyó que las inconsistencias en la ubicación real de los barrenos afectan el diseño de voladura, generando zonas con fragmentación deficiente o sobre trituración, lo que repercute en una menor eficiencia del carguío y mayores costos operativos.

Asimismo, al comparar el rendimiento entre el uso de emulsión gasificada y emulsión energética, los datos de campo muestran que esta última, aunque tiene un costo unitario ligeramente superior, permite una fragmentación más fina (reducción de P80 en 18,00 %) y un incremento del Dig Rate en 23,13 %. Estos resultados

guardan coherencia con los hallazgos de González y Ríos (2020), quienes afirman que el uso de explosivos con mayor densidad energética mejora la uniformidad de la fragmentación, reduciendo los tiempos de carguío y mejorando el rendimiento de las palas.

Por otro lado, el análisis económico confirmó que la combinación de control de calidad en perforación y empleo de emulsión energética permitió obtener un ahorro acumulado de USD 2,862.27 considerando el costo por cucharón de pala, lo cual representa un beneficio directo para la operación. Este aspecto es respaldado por el trabajo de Calderón, Quispe y Vega (2019), quienes demostraron que mantener la precisión en perforación genera impactos positivos, tanto en los indicadores operativos como en la reducción de costos asociados al ciclo de minado.

Adicionalmente, los resultados relacionados al comportamiento del Dig Rate según calidad de voladura son coherentes con lo señalado por Burt y Banks (2010), quienes realizaron una revisión sobre el efecto de la fragmentación en la productividad de las palas, concluyeron que una mala calidad de rotura debido a un diseño deficiente, afecta directamente la tasa de excavación, incrementando el tiempo por ciclo y el desgaste de los equipos.

En conjunto, los resultados obtenidos en esta investigación validan que la implementación de estándares de control en perforación y la adecuada selección del explosivo no solo optimizan la fragmentación del macizo rocoso, sino que permiten mejorar el rendimiento de las palas y reducir significativamente los costos por

tonelada removida. Estos beneficios refuerzan la necesidad de integrar estos controles como parte del diseño técnico-operativo en minas a cielo abierto, bajo el enfoque de mejora continua y eficiencia.

CONCLUSIONES

Se concluye que el control de calidad en taladros de producción tiene una influencia directa y significativa en la eficiencia del Dig Rate de las palas.

Siendo las desviaciones superiores a 3.00 metros un factor determinante en la pérdida de rendimiento del Dig Rate. Los taladros con ubicación precisa favorecieron una mejor distribución de la energía explosiva, logrando fragmentación uniforme y mayores tasas de excavación, superiores a 9,000 t/h, demostrando que la implementación de controles de calidad en perforación contribuye a incrementar la productividad y a reducir los ciclos operativos de minado.

Se identificó las desviaciones de taladros de producción que sobrepasan el límite, desviaciones superiores a 3.00 m, afectando de manera negativa la fragmentación del macizo rocoso, generando zonas de sobre o sub fragmentación que reducen la eficiencia del carguío. Asimismo, los taladros con ubicación precisa, dentro de los límites de tolerancia, favorecieron una fragmentación más homogénea y una mejor distribución de la energía explosiva, lo cual contribuyó a un avance más eficiente del ciclo de minado.

Se aplicaron dos tipos de explosivos donde se realizó la evaluación comparativa, demostrando que la emulsión energética presentó un mejor desempeño técnico frente a la emulsión gasificada, reduciendo el P80 en 18,00 % y aumentando el Dig Rate en 23,13 %.

Estos resultados validan su efectividad para mejorar la calidad de la voladura y el desempeño del equipo de carguío.

Se analizaron los resultados post voladura confirmando que existe una relación directa entre la fragmentación (P80) y el Dig Rate de las palas. Una fragmentación adecuada permitió una mayor eficiencia de carga, reduciendo el número de pases por camión y el esfuerzo operativo de los equipos. Asimismo, el uso combinado de perforación controlada y emulsión energética generó un ahorro acumulado de USD 2,862.27, validando la relación técnica y económica entre fragmentación, productividad y costos operativos.

RECOMENDACIONES

Establecer un sistema continuo de control de calidad en perforación, que contemple la verificación diaria de coordenadas reales, inclinación y profundidad de cada taladro, con la finalidad de mantener las desviaciones dentro del límite aceptable. Esto permitirá mantener la precisión en el diseño de mallas y garantizar una distribución homogénea de la energía explosiva, mejorando así el rendimiento del Dig Rate y reduciendo los costos operativos del carguío.

Fortalecer la capacitación del personal operativo de perforación y voladura, enfocándose en los datos reales del campo de estudio y la correcta respuesta según los procedimientos pertinentes. Así como en la comprensión del impacto que tienen las desviaciones en la eficiencia del proceso de carguío y fragmentación del macizo. Se recomienda sustituir la emulsión gasificada por emulsión energética, debido a su mayor desempeño técnico en zonas con mayor dureza o donde se requiera una fragmentación más fina, tomando en cuenta los resultados evidenciados en esta investigación.

Desarrollar campañas de monitoreo de forma continua sobre la relación entre la fragmentación (P80) y el Dig Rate, utilizando sistemas de control de producción y análisis estadístico. Esta práctica permitirá identificar tendencias de eficiencia y anticipar posibles pérdidas de rendimiento. Asimismo, se sugiere integrar los datos de perforación, voladura y carguío en una plataforma digital o *dashboard* operativo.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, D., & Rojas, M. (2020). *Aplicación de detonadores electrónicos en operaciones mineras subterráneas*. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Black Diamond Drilling. (2021). *Mining and blasting fundamentals: Secondary blasting techniques*. Perth, Australia: Black Diamond Drilling Services Australia Pty Ltd.
- Burt, C., & Banks, G. (2010). A review of rock fragmentation by blasting and its effect on shovel digging productivity. *Mining Technology*, 119(2), 77–83.
- Calderón, M., Quispe, F., & Vega, D. (2019). Influencia de la precisión de perforación en la eficiencia de carguío en minería a cielo abierto. *Revista Ingeniería Minera*, 15(2), 45–53.
- Camacho, J., Torres, L., & Méndez, P. (2018). *Optimización de voladuras utilizando sistemas de iniciación electrónica en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Casani Huamani, J. (2022). *Evaluación del control de calidad en perforación y su influencia en la estabilidad de taludes en operaciones mineras a cielo abierto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Chiappetta, R. F. (1990). *Blasting principles for open pit mining*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Chiappetta, F. (2010). *Blast vibration and airblast control*. *Explosives Engineers' Handbook*, Society of Explosives Engineers (SEE).
- Ghosh, P. K. (2016). Optimization of drill and blast parameters for improved productivity in opencast coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(1), 87–93.

- González, R., & Ríos, C. (2020). *Optimización de la fragmentación en voladuras*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Gutiérrez, J. (2014). *Evaluación del impacto de las desviaciones en perforación sobre el rendimiento de la voladura*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Halatchev, R. A., & Knights, P. F. (2007). Spatial variability of shovel dig performance. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 21(2), 91–98.
- INATEC (2022). *Manual técnico de voladuras en minería*. Instituto Nacional Tecnológico.
- Jimeno, C. L., López Jimeno, E., & Ayala, J. L. (1995). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid, España: Editorial McGraw-Hill.
- Jorajuría, D. (2017). *Estadística aplicada en minería*. Editorial UPC.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Surface blast design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Langefors, U., & Kihlström, B. (1978). *The modern technique of rock blasting* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- López, S., & Salas, J. (2017). Parámetros operativos del Dig Rate en minería. *Revista de Tecnología Minera*, 10(1), 23–30.
- McKenzie, C. K. (2012). *Explosives engineering: Construction, quarrying, and mining*. CRC Press.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Wiley.
- Nieto, A. (2021). *Desviaciones en perforación y su impacto en el diseño de mallas de voladura*. Tesis de maestría, PUCP.
- Olazábal, J. (2014). *Diseño y operación de rampas mineras para el transporte de material en minas a cielo abierto* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.

- Orica. (2021). *i-kon™ III Electronic Blasting System – Product Manual*. Orica Mining Services.
- Paredes, J. (2014). *Optimización de los tiempos de retardo en voladuras mediante el uso de detonadores electrónicos*. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Peng, S. S. (2017). *Surface and underground excavation: Methods, techniques and equipment*. CRC Press.
- Posada Perú. (2021). *Manual técnico de perforación y voladura en minería superficial*. Lima, Perú: Posada Perú S.A.C.
- Ramírez, H. (2018). *Evaluación del uso de emulsiones versus ANFO en tajos duros*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Rojas, M., & Miranda, L. (2020). Análisis comparativo de emulsiones en minería a cielo abierto: rendimiento y costos operativos. *Revista de Ingeniería de Minas*, 15(2), 35–42.
- Salinas Canal, K. R., & Ninahuanca Chumbe, J. R. (2022). *Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura, y su incidencia en el rendimiento de los equipos de carguío bajo el concepto mine to mill, en una mina a tajo abierto* (Tesis de pregrado). Universidad Continental.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. B. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Segarra, P., Sanchidrián, J., & Castillo, D. (2019). Efecto del acoplamiento sensor-roca en la medida de vibraciones por voladura. Madrid: *Revista de minería de la universidad Politécnica de Madrid*.
- Split Engineering (2020). *Fragmentation Analysis Software Manual*. Split-Desktop.
- Vargas, J. (2020). Comparativa de energía explosiva en operaciones mineras. *Revista Minería Hoy*, 13(4), 34–39.
- Vega Vargas, J. L. (2024). *Voladura con detonadores electrónicos en la mejora de la fragmentación de rocas – Unidad Minera Pucamarca – Compañía Minera Minsur S.A. 2020* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional San Luis Gonzaga.

ANEXOS

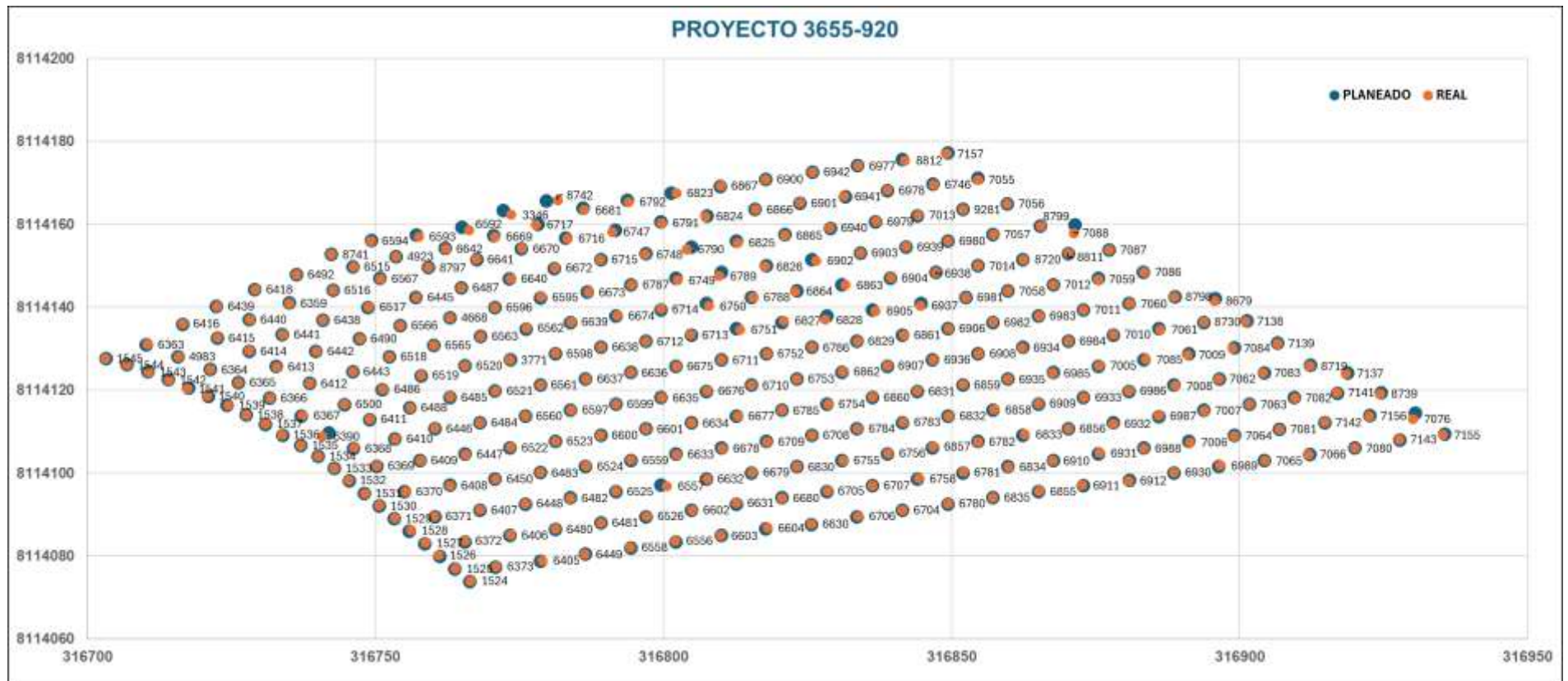
ANEXO 01: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES
PROBLEMA GENERAL: ¿Cómo afectar el controlar la calidad en taladros de producción en el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país? PROBLEMAS ESPECÍFICOS: ¿Cómo afectan las desviaciones de taladros de producción en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país? ¿Cómo afecta el tipo de explosivo cargado en los taladros de producción en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país? ¿Cómo afecta la fragmentación obtenida en el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país?	OBJETIVO GENERAL: Evaluar el impacto del Control de calidad en taladros de producción sobre el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país. OBJETIVOS ESPECÍFICOS: Identificar las desviaciones de taladros de producción que sobrepasan el límite y el impacto que genera en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país. Emplear el tipo de explosivo adecuado para la carga en los taladros de producción y el impacto que genera en la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país. Analizar el Dig Rate de las palas de acuerdo a la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país.	HIPÓTESIS GENERAL: Un control de calidad eficiente en taladros de producción mejorará el Dig Rate de las palas en una Mina del sur del país. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS: Identificando las desviaciones de taladros de producción que sobrepasan el límite se mejorará la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país. Empleando el tipo de explosivo adecuado para la carga de los taladros de producción se podrá mejorar la fragmentación obtenida en una Mina del sur del país. A menor tamaño de fragmentación del material volado se obtendrá un mayor Dig Rate en palas en una Mina del sur del país.	VARIABLE INDEPENDIENTE Control de calidad. Indicadores Desviación de taladros Tipo de explosivo VARIABLE DEPENDIENTE Dig Rate. Indicadores Tasa de excavación Velocidad de excavación Fragmentación
MÉTODO Y DISEÑO	POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	
MÉTODO Análisis estadístico NIVEL Aplicativo	Se recolectará datos numéricos sobre el desempeño de los taladros de producción, distancia de desviación y el Dig Rate de las palas.	TÉCNICAS Revisión documental Observación directa INSTRUMENTO Revisión documental Observación directa TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Distribución de frecuencias	

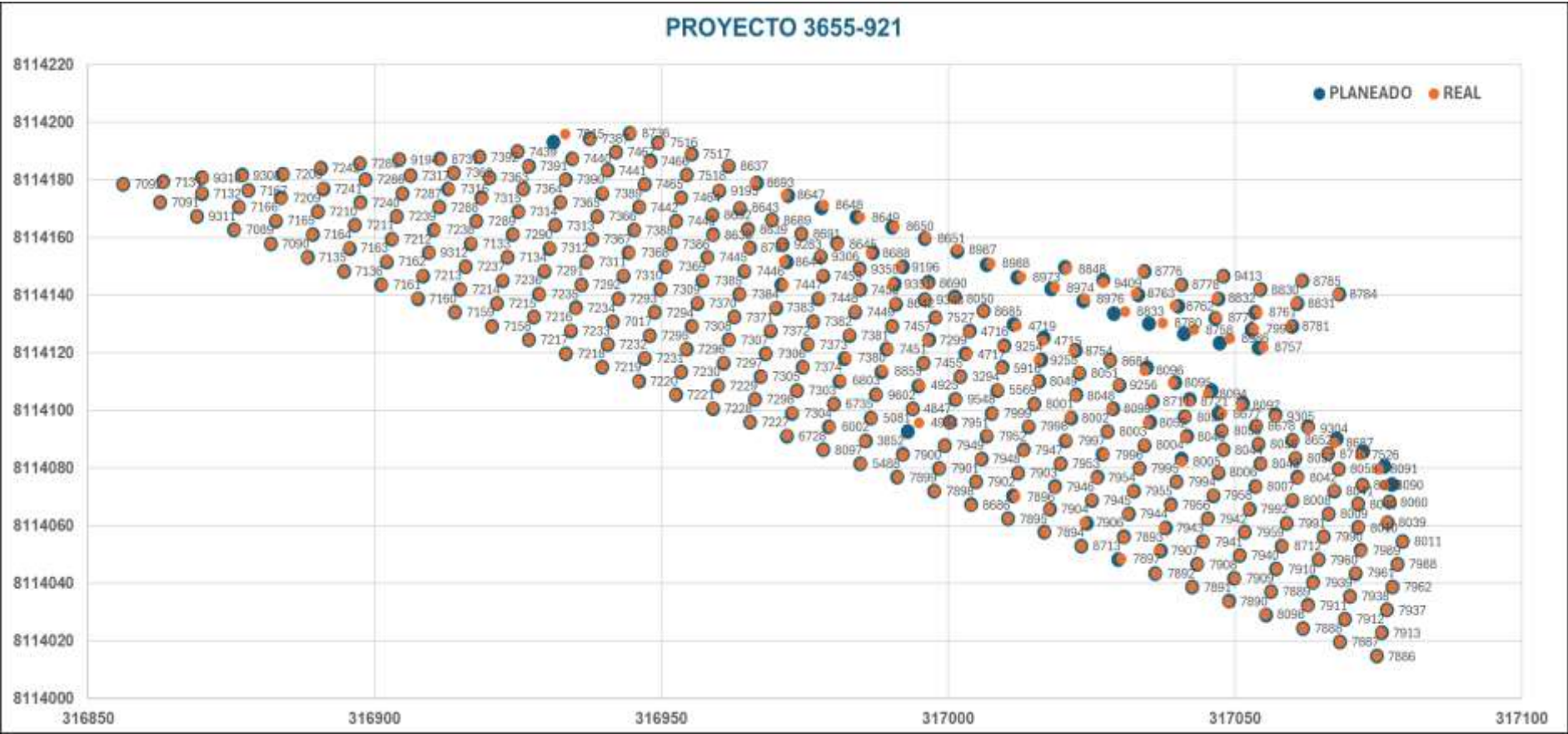
ANEXO 02: Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE ASOCIADA	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	NIVEL DE MEDICIÓN	TECNICA	INSTRUMENTO
Control de calidad en taladros de producción	Gutiérrez (2014) El control de calidad es el conjunto de técnicas y procedimientos del que se sirve la dirección para la obtención de un producto de la calidad Deseada.	Procesos que se llevan a cabo para mejorar los resultados de la voladura.	Precisión de los taladros. Ampliación de malla	- Precisión de GPS - Precisión del perforista - Límite tolerable de desviación - Tipo de explosivo	Razón Nominal	Recolección documental.	Análisis documental. Observación.
Impacto en el Dig Rate de las palas	Rojas y Miranda (2020) El dig rate es la velocidad de excavación de los equipos de carguío que se obtiene a partir de información del sistema Dispatch y que considera las variables: tonelaje total cargado y tiempo efectivo de carguío.	Velocidad de excavación de las palas, medido en toneladas por hora al realizar el carguío.	Tasa de excavación	- Velocidad de excavación - Fragmentación - Tiempo por cucharón cargado - Costo por cucharón cargado	Nominal	Recolección documental.	Análisis documental. Observación.

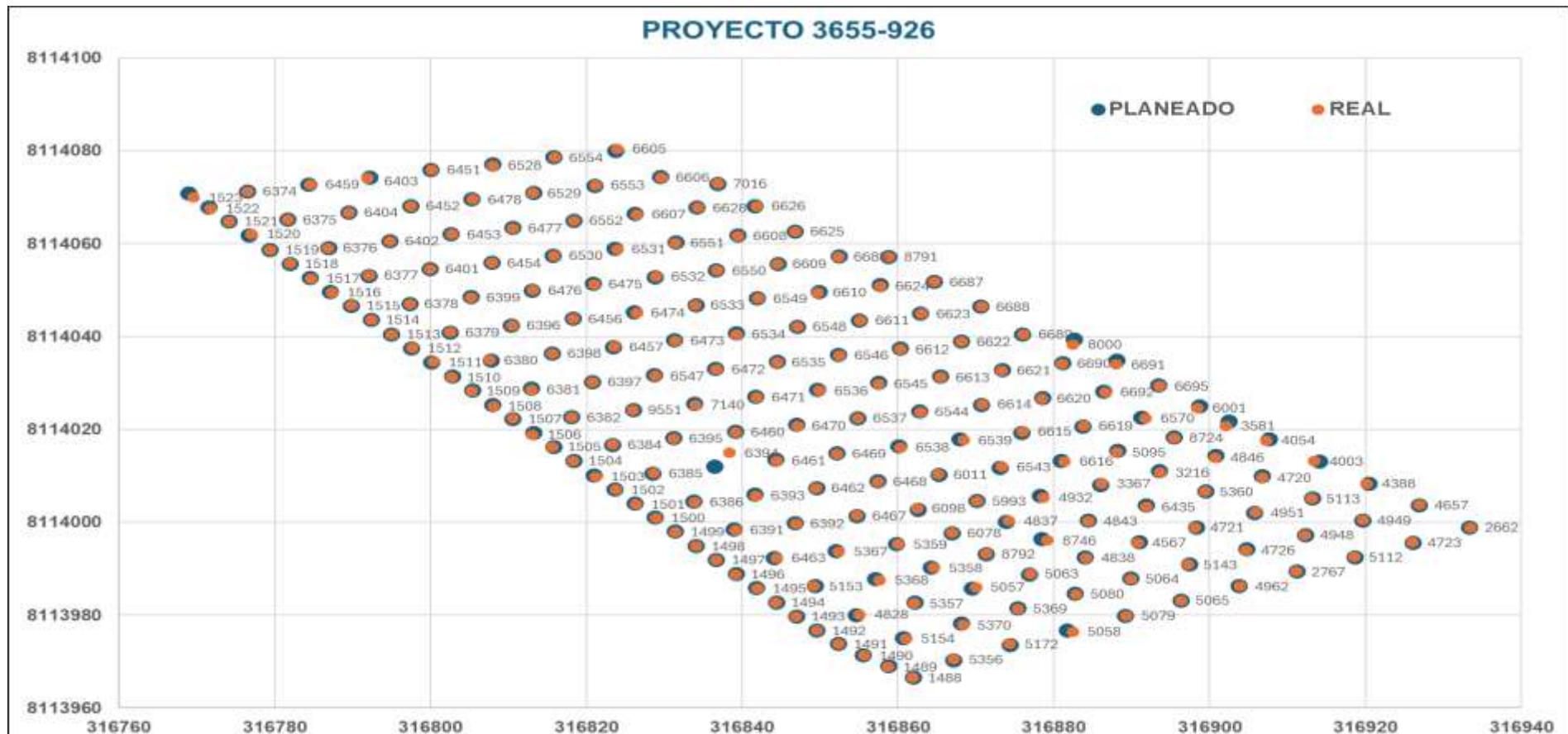
ANEXO 03: Malla de perforación del proyecto 3655-920



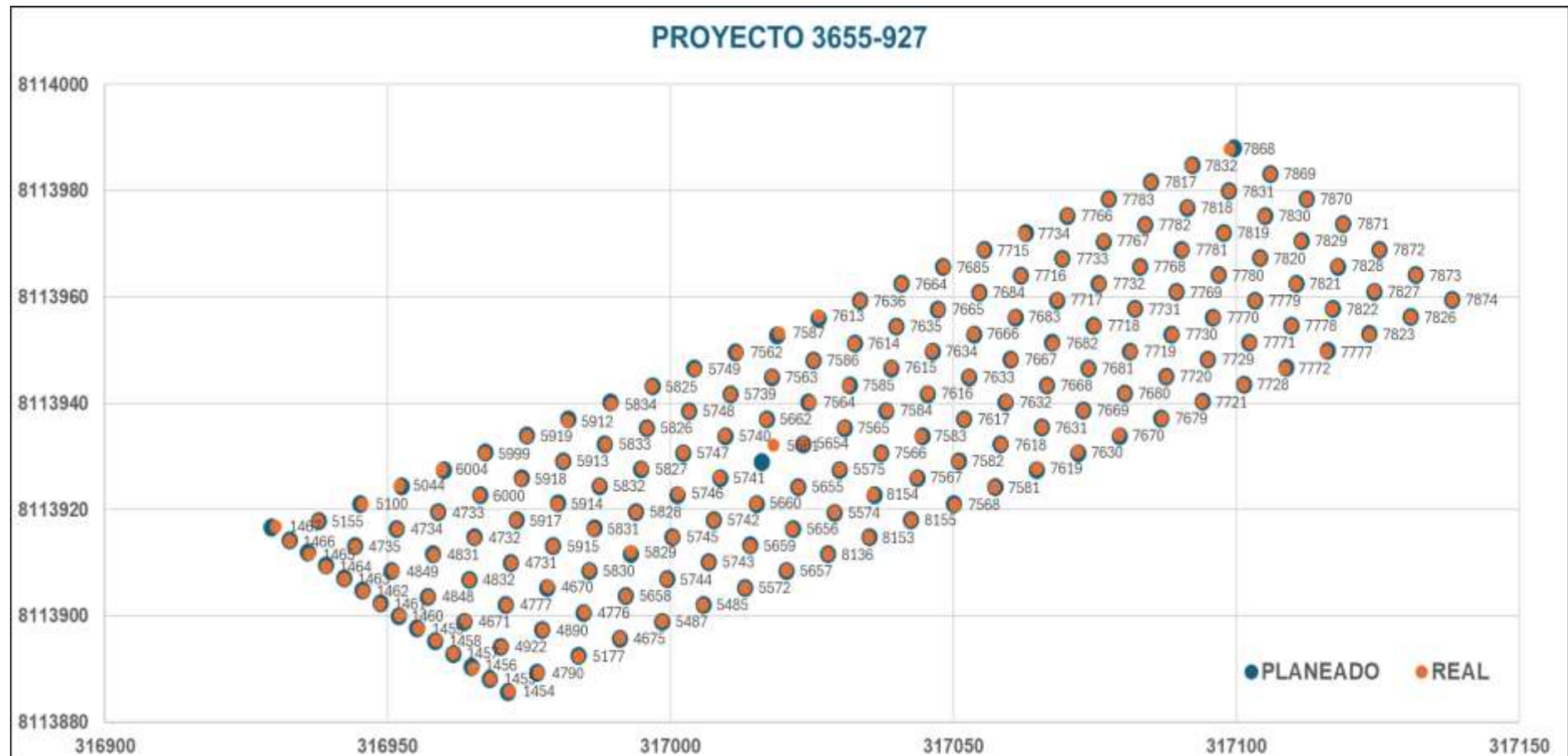
ANEXO 04: Malla de perforación del proyecto 3655-921



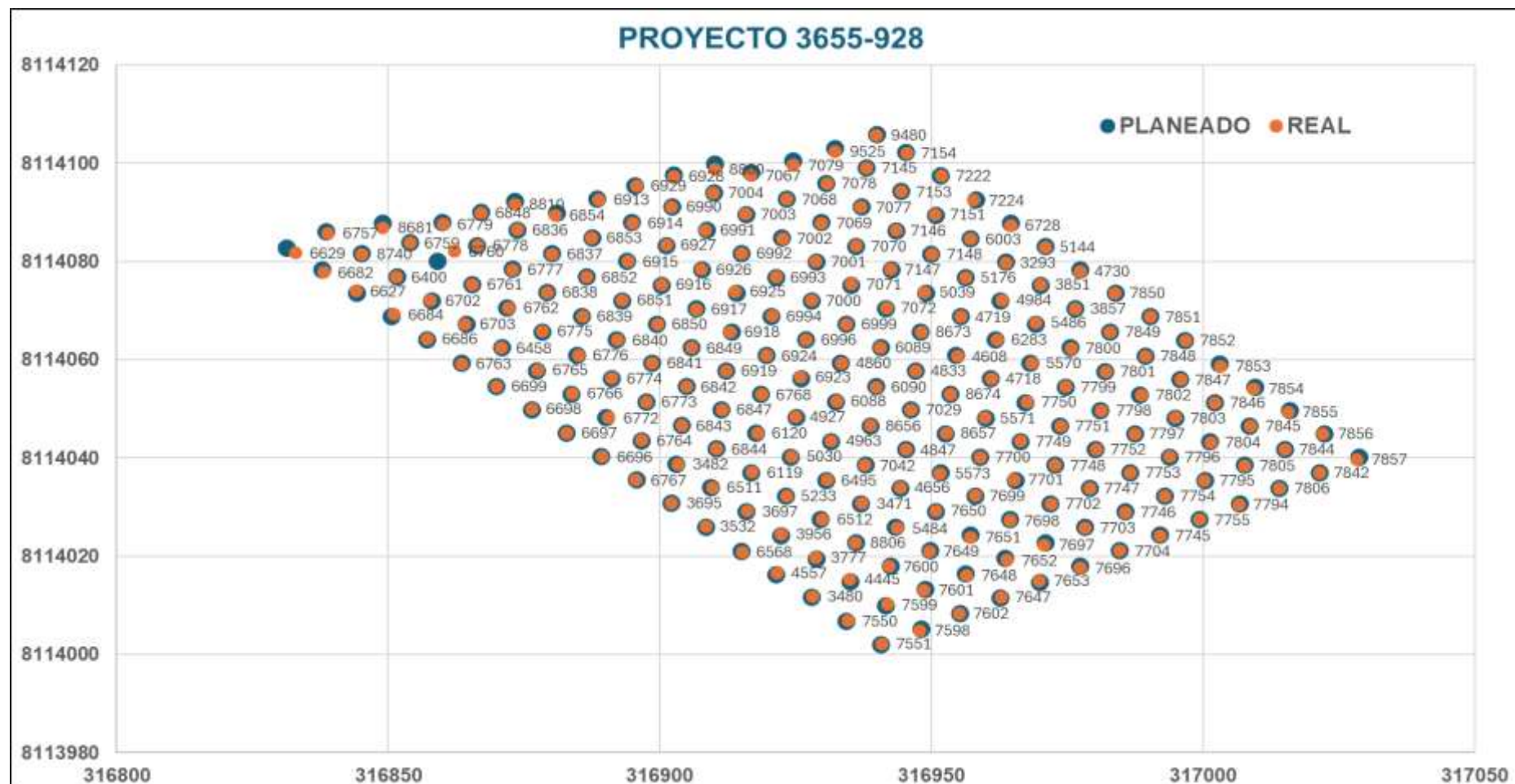
ANEXO 05: Malla de perforación del proyecto 3655-926



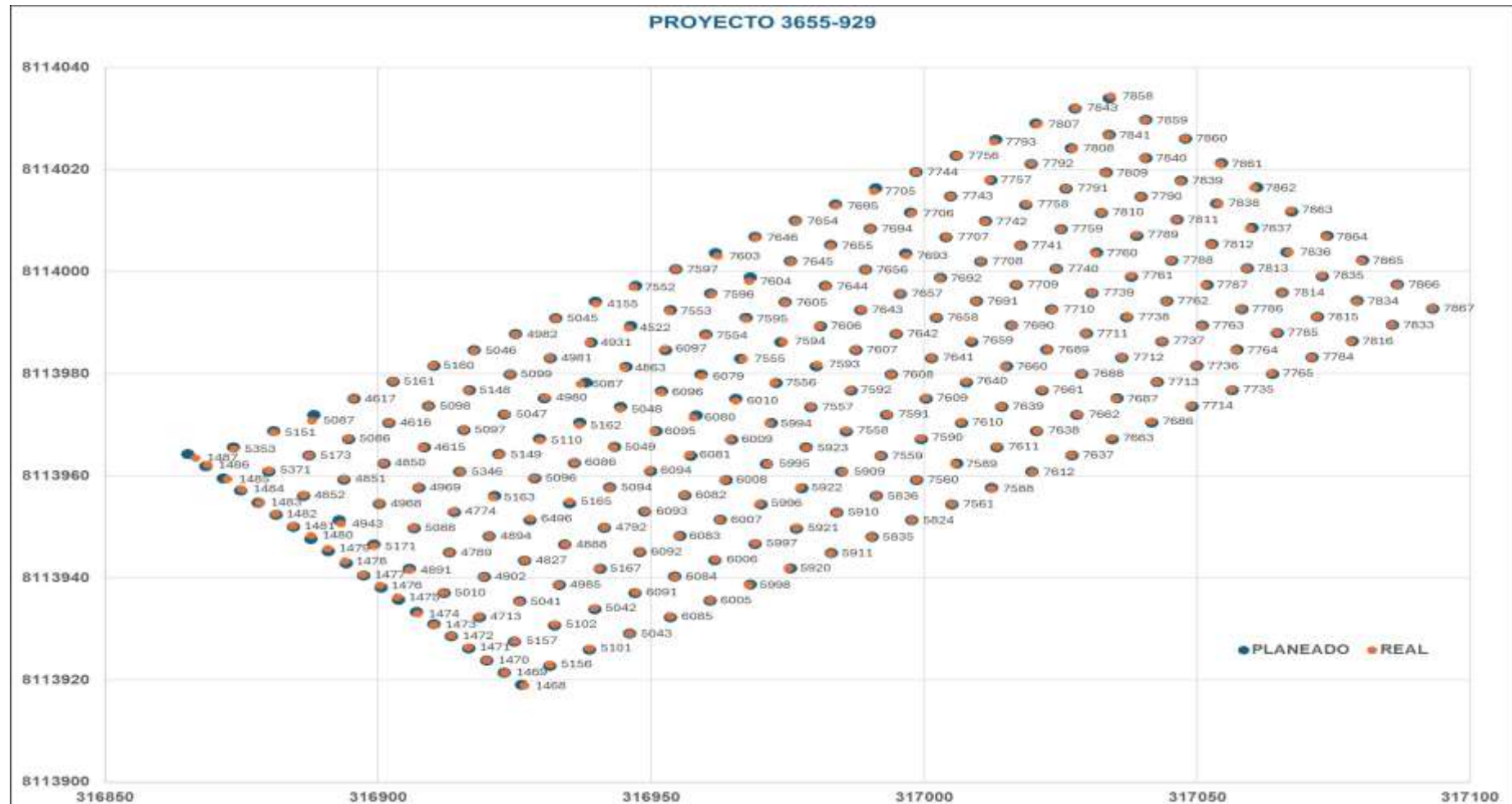
ANEXO 06: Malla de perforación del proyecto 3655-927



ANEXO 07: Malla de perforación del proyecto 3655-928



ANEXO 08: Malla de perforación del proyecto 3655-929



ANEXO 09: Resultado fragmentación proyecto 3655-928 y 3655-926



ANEXO 10: Formato de Reporte P80

Este	Norte	Nivel	Media P30	Media P40	Media P50	Media P60	Media P70	Media P80	Media P90	Fecha	Polígono
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:27:52	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:31:12	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:33:08	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:34:03	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:34:45	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:35:35	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:36:12	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:37:25	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:38:29	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:39:10	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:39:49	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:40:27	3655-941/W

316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:41:07	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:41:51	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:42:44	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:43:26	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:44:11	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:45:27	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:46:22	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:46:59	3655-941/W
316822.47	8114201.55	3655	5.4761	6.9386	8.3126	9.3672	10.1623	11.0117	11.6264	2025-4-21 11:48:08	3655-941/W
316812.50	8114208.51	3655	6.4285	8.9906	10.4007	12.2433	13.0213	13.3151	13.7271	2025-4-21 11:49:30	3655-941/W
316812.50	8114208.51	3655	6.4285	8.9906	10.4007	12.2433	13.0213	13.3151	13.7271	2025-4-21 11:50:13	3655-941/W
316812.50	8114208.51	3655	6.4285	8.9906	10.4007	12.2433	13.0213	13.3151	13.7271	2025-4-21 11:51:10	3655-941/W
316812.50	8114208.51	3655	6.4285	8.9906	10.4007	12.2433	13.0213	13.3151	13.7271	2025-4-21 11:51:50	3655-941/W

ANEXO 11: Formato de Reporte Dig Rate

Tiempo inicio	Tiempo final	Duración (Seg.)	Volquete	Pala	Polígono	Tonelaje planeado	Tonelaje cargado	Este	Norte	N° pases	Dig Rate
1/05/2025 08:19	1/05/2025 08:22	152.88	V146	P07	3655-941/W	371.999	366.1	316790.2706	8114099.726	4	7971.402414
1/05/2025 08:32	1/05/2025 08:36	191.1	V137	P07	3655-941/W	371.999	379.7	316760.3226	8114108.716	5	4905.478408
1/05/2025 08:37	1/05/2025 08:40	152.88	V166	P07	3655-941/W	375.001	376.3	316790.1309	8114098.803	4	8940.41554
1/05/2025 08:41	1/05/2025 08:44	191.1	V146	P07	3655-941/W	371.999	368.2	316759.2963	8114111.074	5	6903.070131
1/05/2025 08:45	1/05/2025 08:48	152.88	V138	P07	3655-941/W	371.999	343	316800.047	8114107.836	4	7786.020962
1/05/2025 08:49	1/05/2025 08:52	152.88	V133	P07	3655-941/W	371.999	339.2	316758.6126	8114108.117	4	7161.473826
1/05/2025 08:53	1/05/2025 08:57	229.32	V140	P07	3655-941/W	371.999	372.9	316792.3072	8114103.526	6	6532.66149
1/05/2025 09:01	1/05/2025 09:05	152.88	V131	P07	3655-941/W	371.999	353.5	316762.3678	8114104.83	4	6005.36146
1/05/2025 09:06	1/05/2025 09:07	114.66	V146	P07	3655-941/W	371.999	359.6	316790.8045	8114099.547	3	26783.91211
1/05/2025 09:11	1/05/2025 09:13	114.66	V138	P07	3655-941/W	371.999	351.1	316761.3937	8114114.69	3	11851.28854
1/05/2025 09:14	1/05/2025 09:17	229.32	V136	P07	3655-941/W	371.999	371.7	316790.2933	8114097.144	6	6171.40832
1/05/2025 09:19	1/05/2025 09:21	191.1	V141	P07	3655-941/W	371.999	363.2	316759.166	8114105.724	5	9048.618956

1/05/2025 09:22	1/05/2025 09:26	229.32	V133	P07	3655-941/W	371.999	377.1	316786.7172	8114100.248	6	6469.543988
1/05/2025 09:27	1/05/2025 09:31	267.54	V131	P07	3655-941/W	371.999	371.6	316765.0812	8114098.951	7	5556.828238
1/05/2025 09:40	1/05/2025 09:43	191.1	V138	P07	3655-941/W	371.999	374.6	316815.9971	8114096.602	5	6903.070131
1/05/2025 09:46	1/05/2025 09:50	229.32	V136	P07	3655-941/W	371.999	354.2	316810.5084	8114098.613	6	5488.50658
1/05/2025 09:51	1/05/2025 09:54	191.1	V131	P07	3655-941/W	371.999	367.6	316777.0255	8114092.6	5	6763.614169
1/05/2025 09:55	1/05/2025 09:58	191.1	V133	P07	3655-941/W	371.999	349	316809.6164	8114099.159	5	8639.971648
1/05/2025 10:01	1/05/2025 10:03	152.88	V138	P07	3655-941/W	371.999	335.1	316812.5386	8114093.067	4	10977.01316
1/05/2025 10:05	1/05/2025 10:08	152.88	V136	P07	3655-941/W	371.999	338.6	316767.9574	8114094.734	4	8696.07536
1/05/2025 10:09	1/05/2025 10:11	152.88	V137	P07	3655-941/W	371.999	374.2	316809.7821	8114100.482	4	8987.88997
1/05/2025 10:13	1/05/2025 10:23	267.54	V131	P07	3655-941/W	371.999	384.8	316775.9805	8114090.377	7	2333.093389
1/05/2025 10:23	1/05/2025 10:27	191.1	V133	P07	3655-941/W	371.999	365.9	316806.7369	8114103.745	5	5978.55181
1/05/2025 10:28	1/05/2025 10:31	152.88	V138	P07	3655-941/W	371.999	369.4	316768.4376	8114097.29	4	9235.831762
1/05/2025 10:31	1/05/2025 10:36	267.54	V137	P07	3655-941/W	371.999	356.8	316810.1801	8114098.949	7	4224.591815
