



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# IMPACTOS DE NO EFECTUAR LA TRONADURA DE PRECORTE EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

MATÍAS ANDRÉS GUERRERO BUSTOS

PROFESOR(ES) GUÍA: JOSÉ SALAZAR NAVARRETE, PhD  
HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DEL  
DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE  
SISTEMAS

SANTIAGO – CHILE  
2025



**IMPACTOS DE NO EFECTUAR LA TRONADURA DE PRECORTE EN MINERÍA A  
CIELO ABIERTO**

Por: **MATÍAS ANDRÉS GUERRERO BUSTOS**

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESORES GUÍA:** José Salazar Navarrete, PhD y Héctor Valdés-González, PhD

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** Maria Vivanco Soffia, Ming. (UNAB)

**PROFESOR INTEGRANTE 2:** Lorenzo Reyes Bozo, PhD (UDLA)

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de  
Sistemas en la Universidad del Desarrollo de Chile

2025

Santiago, Chile

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado **IMPACTOS DE NO EFECTUAR LA TRONADURA DE PRECORTE EN MINERIA A CIELO ABIERTO**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo, a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Guerrero Bustos', with a large, stylized flourish underneath.

MATÍAS ANDRÉS GUERRERO BUSTOS

Firma

*A Catalina y Leonor*

*Los pilares de mi vida*

*"No temas, porque yo estoy contigo*

*No te desalientes, porque yo soy tu Dios" ...*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo de manera especial al profesor Héctor Valdes-Gonzalez, PhD, por su enorme paciencia, gran empatía y palabras de aliento que tuvo conmigo durante todo lo que duro el programa de Magister, incluso cuando se veía obscuro el escenario en mi vida personal, siempre empujó para lograr el objetivo, por todo esto, *gracias*, profesor.

Agradecer al profesor José Luis Salazar, PhD. que, aunque de manera algo desordenada le entregaba información y no fui regular en las comunicaciones con él, jamás perdió su buena actitud para conmigo que lo caracterizaba, me entregó los tips necesarios para completar la investigación y tuvo el tiempo y la dedicación para apoyarme en la culminación del proyecto. Muchas gracias, profesor.

Agradecer a la Universidad del Desarrollo y su programa de Magíster, en especial a todo el cuerpo académico que lo conforma, dado que cualquier consulta, coordinación o acción fuera del curso cotidiano del Post Grado, fueron resultas, contestadas y atendidas correctamente, lo que generó una gran tranquilidad para mí y demostró el gran nivel no sólo técnico, sino humano de cada uno de ellos.

Agradecer a mis compañeros de programa: Daniel, José y Pablo quienes me agregaron a su grupo cuando yo aún no sabía que había que formar alguno y terminamos el programa formando una bonita amistad. Gracias muchachos por el apoyo, ¡al final terminamos todos!

Agradecer a Manuel Paz geotecnico de la Guardia 3 y Juan Pablo Avendaño, ingeniero de tronadura Enaex, ambos de Chuquicamata. Quienes, sin ninguna dilación, con toda la disposición posible y sin pedir algo a cambio, me facilitaron toda la información que les pedí durante el transcurso de este programa. A ambos gracias.

Agradecer a Marco Vallejos, quien marcó el inicio de la elaboración de los análisis detallados en este trabajo. Esto pues, envió información relevante para la realización de este programa, además de guiar y entregar antecedentes que serían fundamentales para la elaboración y termino del proyecto. Sin duda alguna, esto no se hubiese podido llevar a cabo sin su cooperación.

Agradecer a Alvaro Lozada quien fue el impulsor del tema central de la investigación. Fue durante una discusión de los problemas operacionales que nos atañen en el día a día, cuando de manera empírica reparamos en los daños de los equipos y como esto se relacionaba con la práctica de los precortes, lo que conllevó a realizar la investigación.

Agradecer a Oliver, quien me acompañó durante todo el programa, colocando su patita en mi regazo y me esperó pacientemente para cada paseo, me tranquilizó cuando las cosas no marchaban bien y hasta el día de hoy sigue a mi lado.

Agradecer a mi señora Catalina, por su paciencia, palabras de ánimo y siempre su cálida contención cuando se juntaba todo, no tengo palabras para poder agradecer todo el apoyo que me diste en este tiempo, considerando el nacimiento de nuestra hija entre medio, gracias mi Valquiria.

Agradecer a mi hija, Leonor, cuya vida casi se enmarca en el mismo periodo de tiempo que duró el Magister. A tí, hija, gracias por esperarme.

# IMPACTOS DE NO EFECTUAR LA TRONADURA DE PRECORTE EN MINERIA A CIELO ABIERTO

MATÍAS ANDRÉS GUERRERO BUSTOS

Bajo la supervisión de los profesores Jose Salazar Navarrete, PhD y Héctor Valdés-González, PhD en la  
Universidad del Desarrollo de Chile

## Resumen

Este trabajo analiza los resultados empíricos de no detonar la perforación de precorte en la Mina a Cielo Abierto Chuquicamata en sus distintas fases: F49 Superior, F49 Extendida, F38 R y F49 IP, presentando esta técnica como una estrategia válida para la extracción de material. El objetivo de la investigación corresponde a determinar cuáles son las consecuencias de prescindir de la detonación del precorte en la Mina Chuquicamata para sus distintas fases, de tal manera que se pueda evaluar como una técnica económicamente viable, así como determinar las condiciones de su aplicación para asegurar la estabilidad y eficiencia de la operación. Para lograrlo, la metodología empleada fue la de un enfoque cuantitativo en la cual se compararon los resultados obtenidos de 31 tronaduras comprendidas entre el periodo Enero -Abril 2025 para las dos variantes en la detonación. Se emplearon herramientas de análisis estadístico como ANOVA y de correlación como el de Pearson, para las distintas variables operacionales y económicas. La evaluación se centró en la brecha entre valores logrados y requeridos en líneas de diseño y ángulos de talud, complementada con indicadores de recuperación de mineral, costos de operación y posibles efectos en equipos de carguío. Los resultados muestran que, en las unidades PEC, PEK y PES no se evidencian diferencias significativas en estabilidad ni en cumplimiento geométrico al prescindir de la detonación del precorte, obteniendo en promedio un 97% de cumplimiento de la línea de programa. En contraste, las unidades PEC, MET, GES y LIX presentaron un incremento del sobre quiebre, pérdida de control geométrico y mayores costos por retrabajo y saneamiento de talud. La relación entre la ausencia de precorte y los daños en baldes de equipos no fue concluyente estadísticamente, aunque los datos sugieren la necesidad de profundizar en esta hipótesis. Por otro lado, en la arista económica los datos muestran que existe una alternativa de ahorro que podría bordear el 8% del costo total por tronadura, cuando ésta posea precorte y cumpliendo las condiciones de UGTB antes señaladas. Se concluye que, no detonar los precortes puede ser recomendada en litologías predominantes del tipo PEC, PEK y PES, donde los beneficios superan los costos asociados, alcanzando en algunos casos el 8% del costo total de la tronadura, mientras que en el resto de las unidades se mantiene como una técnica que debe ser ajustada necesariamente para asegurar la estabilidad del talud y seguridad operacional. En síntesis, no tronar precortes resulta una técnica válida bajo ciertos parámetros geotécnicos, además, se reconoce la importancia de continuar con estudios más extensos y multivariados que permitan establecer con mayor certeza las correlaciones operacionales y geotécnicas asociadas a esta práctica.

**PALABRAS CLAVE:** Open pit; Full Control; Geotecnia; Operación Minera; Revenue Factor.

## HIGHLIGHTS

### IMPACTOS DE NO EFECTUAR LA TRONADURA DE PRECORTE EN MINERIA A CIELO ABIERTO

MATÍAS ANDRÉS GUERRERO BUSTOS

- Determina impactos de no tronar precortes en rajo abierto
- Utiliza modelo cuantitativo comparativo entre líneas de programa y obtenidas reales
- Considera resultados de 31 tronaduras y distintas variables operacionales
- Muestra que para UGTB PEC,PEK y PES resulta ser una alternativa viable de uso
- Reconoce una validación de parámetros geotécnicos para su implementación

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	2
1.1	Prescindir de la tronadura de Precortes: Novedad, propuesta y contribución .....	8
1.2	Objetivos de la investigación.....	8
2	Metodología .....	9
3	Resultados .....	12
3.1	Análisis de los resultados.....	19
3.2	Discusión de resultados.....	25
4	Conclusiones .....	27
4.1	Trabajos futuros.....	28
5	Referencias.....	29
6	Anexo 1: Revisión de plagio .....	31

# 1 Introducción

## **Mina Chuquicamata: Operación a cielo abierto**

La mina Chuquicamata, ubicada en la región de Antofagasta, es uno de los yacimientos de cobre a cielo abierto más emblemáticos a nivel mundial. Desde su inicio en 1910, ha sido un referente de la minería moderna, llegando a ser considerado el rajo más grande del mundo y aportando históricamente una producción media anual cercana a 481.500 toneladas de cobre fino (Minería Chilena, 2014). Aunque el cierre de la explotación a cielo abierto estaba programado para 2020 (Minería Chilena, 2019), retrasos en el proyecto Chuquicamata Subterránea permitieron extender la vida útil del rajo hasta, al menos, hasta el 2038. Actualmente, su función es complementar la alimentación de la planta concentradora, con leyes promedio cercanas al 0,51 % de cobre y un aporte de 25.000 toneladas por día (tpd), condiciones que demandan optimización de recursos y reducción de costos para sostener la competitividad.

En este escenario, los procesos de perforación y tronadura son fundamentales para la continuidad operacional. La perforación se adapta a las condiciones del macizo rocoso y define los pozos de producción y contorno (precorte) (Bernaola Alonso et al., 2013; De Linan, 1994). La tronadura, por su parte, busca fragmentar la roca garantizando granulometrías adecuadas y control geotécnico (Jimeno et al., 1995; Hidalgo et al., 2004). La tronadura de precorte, en particular, consiste en perforaciones alineadas con menor carga explosiva que generan un plano de debilidad para preservar la geometría del talud (Hidalgo et al., 2004; Himanshu et al., 2024).

La posibilidad de no tronar el precorte bajo ciertas condiciones, se enmarca como una metodología innovadora que que podría generar valor en la cadena de negocio de Chuquicamata y con ello no sólo un ahorro en costo, sino que un cumplimiento a las líneas de programa y cuidado geotécnico. La figura 1 muestra claramente donde se ubica el precorte dentro de la operación minera y contextualiza el problema a abordar en la siguiente investigación.

## **Perforación y tronadura: Generalidades**

La perforación en minería corresponde a la ejecución de pozos en el macizo rocoso mediante equipos manuales o mecánicos, cuyo propósito principal es permitir la posterior carga con explosivos y, de este modo, posibilitar la fragmentación controlada de la roca (Bernaola Alonso et al., 2013). Para esta labor se utilizan máquinas de distinta envergadura capaces de generar barrenos (perforaciones) de diámetros y profundidades variables, en función de objetivos operacionales, condiciones geológicas, diseño de malla y requerimientos de producción. La elección de los parámetros de perforación repercute directamente en la cantidad de explosivo a emplear, así como en el consumo de insumos complementarios como barras de acero, agua y combustible. Las propiedades intrínsecas de la roca condicionan de manera significativa la calidad del proceso de perforación. Factores tales como dureza, resistencia, elasticidad, plasticidad, abrasividad, textura y estructuras geológicas influyen en la velocidad de penetración, en la desviación de los pozos y en la eficiencia global de la operación (De Linan, 1994). En consecuencia, cada faena minera realiza levantamientos detallados de las características geotécnicas de sus zonas de trabajo con el fin de diseñar planes de perforación adecuados a la realidad del macizo.

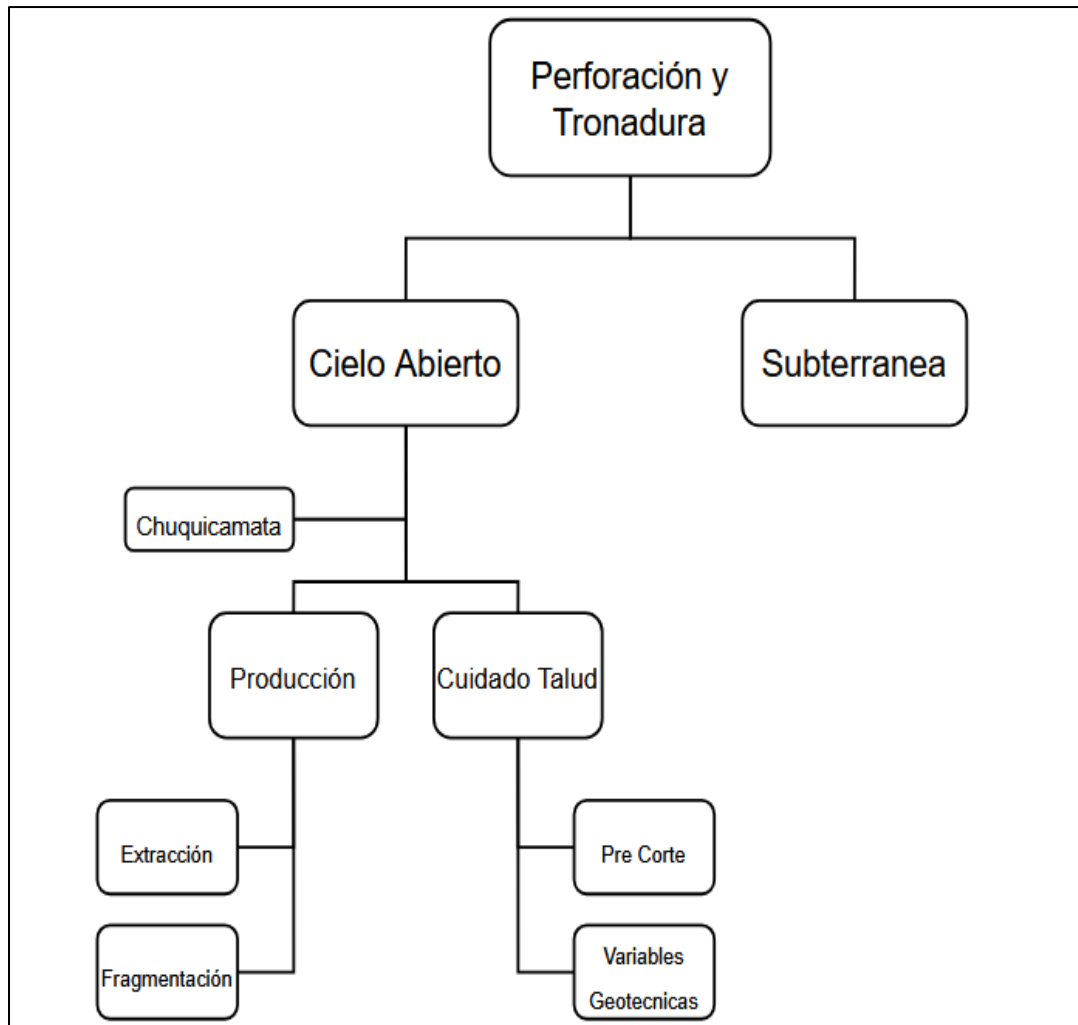


Figura 1: Mapa Conceptual proceso P&T en Chuquicamata (Fuente: elaboración Propia).

La perforación se adapta al método de explotación utilizado, siendo los más comunes la minería a cielo abierto y la minería subterránea. Asimismo, existen perforaciones con fines exploratorios, como la ejecución de sondajes geológicos o de pozos hidráulicos, que cumplen objetivos diferentes, pero se apoyan en técnicas similares. En el caso particular de la explotación a cielo abierto, los diámetros de perforación varían de acuerdo con el diseño minero y pueden clasificarse, en términos generales, en pozos de producción y pozos de contorno o precorte.

Los pozos de producción se vinculan directamente al posterior proceso de carguío y transporte, y se caracterizan por diámetros de gran envergadura, que, en operaciones a gran escala o gran minería, pueden alcanzar valores de 10 <sup>5/8</sup>" o incluso 12" (Jimeno et al., 1995). Por su parte, los pozos de contorno o precorte no tienen como finalidad la extracción de mineral, sino el cuidado del macizo rocoso y la preservación de la geometría del talud. Estos se ejecutan con diámetros menores, del orden de 7,5" o inferiores, y son cargados con cantidades reducidas de explosivo, en coherencia con su rol de control geotécnico (Jimeno et al., 1995). En la revisión del estado del arte se consigna la técnica de recorte o line drilling, concebida como una perforación de cuidado de pared análoga al precorte, pero ejecutada sin carga explosiva. Consiste en una o varias filas de barrenos de un diámetro pequeño,

estrechamente espaciados y rigurosamente alineados, que inducen un plano de debilidad por coalescencia de fracturas cuando opera la tronadura de producción. Su correcta implementación exige diámetros sensiblemente menores, tolerancias geométricas estrictas y, en consecuencia, mayores tiempos de utilización de equipos y costos de perforación para alcanzar, sin explosivo, el nivel de confinamiento y fisuración deseado en el contorno. Si bien reduce el daño inducido y las vibraciones en la pared final, su eficacia resulta altamente sensible al espaciamiento, al diámetro y a la calidad de alineación, por lo que su desempeño puede ser menos consistente que el del precorte en litologías heterogéneas (Cardu et al., 2021).

Por su parte, la tronadura se define como el proceso de fragmentación del macizo rocoso mediante la liberación de energía química contenida en un explosivo, con el propósito de facilitar el posterior carguío y transporte del material fragmentado (Jimeno et al., 1995). Su importancia radica en que constituye una de las etapas críticas dentro del ciclo minero, ya que condiciona tanto la productividad como la estabilidad geotécnica de la operación.

Los objetivos principales de la tronadura se relacionan con la generación de una granulometría adecuada de la roca que optimice las etapas posteriores de carguío, transporte y chancado, junto con la minimización del daño inducido en los taludes y en el macizo remanente. Asimismo, busca garantizar el cumplimiento de las líneas de programa establecidas en el diseño minero, lo cual incluye mantener ángulos interrampa y geometrías de excavación compatibles con la seguridad y continuidad de la operación.

Existen distintos tipos de tronadura según los requerimientos específicos de la faena. Entre ellos, se distinguen: la tronadura de producción, orientada al fragmentado del mineral para su carguío y transporte; la tronadura de precorte o contorno, cuyo propósito es proteger la estabilidad del talud y delimitar la excavación; la tronadura secundaria, utilizada para reprocesar o reducir el tamaño de bloques de gran envergadura que no fueron fragmentados adecuadamente; y la tronadura de desarrollo, aplicada en minería subterránea para generar avances horizontales o verticales de galerías y chimeneas.

El proceso técnico de la tronadura comprende varias etapas. Inicialmente, los pozos perforados son rellenados con explosivo, al que se incorpora un sistema de iniciación compuesto por un detonador y un taco. Este último corresponde a un material inerte dispuesto en la parte superior del pozo, cuya función es actuar como tapón que impida la liberación prematura de gases hacia la superficie. De esta manera, la energía liberada por la reacción química explosiva se concentra en el interior de la roca, favoreciendo la formación de grietas internas y logrando una fragmentación más eficiente (Hidalgo et al., 2004)

### **Tronadura de Precorte**

La tronadura de precorte constituye una técnica de control geotécnico utilizada principalmente en minería a cielo abierto y en obras civiles de gran envergadura. Su finalidad es generar un plano de debilitamiento controlado en el macizo rocoso mediante la ejecución de una serie de perforaciones alineadas y de diámetro similar, cargadas con una cantidad reducida de explosivo. Con ello se busca que, al momento de la detonación, se forme una grieta continua que delimite el contorno de la excavación, reduciendo la influencia de la energía liberada por la tronadura de producción sobre la pared final del talud (Hidalgo et al., 2004). De esta manera, se preserva la geometría diseñada y se

incrementan las condiciones de estabilidad y seguridad, evitando la sobre excavación y el deterioro del macizo remanente.

La técnica se diferencia de la tronadura convencional en que el factor de carga de explosivo es considerablemente menor, lo que disminuye los daños inducidos en la roca circundante. Asimismo, el precorte se ejecuta de manera previa a la tronadura de producción, de modo que actúe como una línea de contención que absorba y limite la propagación de fracturas. Para garantizar la efectividad de este procedimiento, la perforación de precorte se detonan con una velocidad de iniciación mayor a la de los pozos de producción, lo que permite establecer el plano de debilidad antes de que se genere la fragmentación masiva del material. Otra característica técnica es la ausencia de cara libre, lo que implica que la energía liberada se concentre en la fisuración interna y no en la proyección de material hacia el exterior (Jimeno et al., 1995).

Si bien la tronadura de precorte se utiliza con alta frecuencia en minería a cielo abierto, su aplicación en minería subterránea es más restringida y se limita a situaciones puntuales, principalmente debido a la geometría de los pozos, que en este contexto suelen ser verticales y menos adecuados para este tipo de técnica. Sin embargo, en obras civiles, como la construcción de carreteras y túneles, el precorte ha demostrado ser una práctica eficaz para preservar la estabilidad de taludes y evitar desprendimientos (Himanshu et al., 2024).

La literatura técnica, enfatiza que la eficacia del precorte depende de un diseño riguroso de la malla de perforación, incluyendo parámetros como burden, espaciamiento, diámetro de los pozos, cantidad de carga por metro y secuencia de detonación (Persson et al., 1994). Cuando se diseña e implementa correctamente, la técnica permite obtener paredes de alta calidad geotécnica, con mínimas irregularidades y sin sobre excavación significativa. Por estas razones, la tronadura de precorte es recomendada como una práctica de uso habitual en faenas de cielo abierto donde la estabilidad de los taludes constituye una prioridad operacional y de seguridad.

### **Line drilling o Recorte**

La técnica de *line drilling*, también conocida como recorte, consiste en generar un plano de debilidad o fractura controlada a lo largo del contorno de un talud o pared final, mediante una secuencia de perforaciones sin carga explosiva. Esta metodología permite proteger la integridad estructural del macizo rocoso adyacente, evitando los efectos adversos inducidos por la tronadura, tales como la sobreexcavación o la generación de fracturas indeseadas (Cardu et al., 2021).

Su aplicación es especialmente pertinente en contextos donde se requiere evitar la transmisión de vibraciones hacia la pared, cuando la geometría del talud es crítica para la estabilidad o funcionalidad de la obra, y cuando el proyecto dispone de un presupuesto suficiente para cubrir el elevado costo asociado a la densidad de perforación que esta técnica demanda (Luo et al., 2025).

La diferencia entre Line Drilling (recorte) y el pre corte radica en la técnica (tabla I), propósito y el efecto en el comportamiento de la roca. Ambos son usados para controlar los daños en el talud por tronadura, sin embargo, presentan diferencias sustantivas.

Tabla I: Diferencia Line Drilling vs Precorte (Fuente Elaboración Propia).

Característica	Recorte	Precorte
Propósito	Crear un plano de separación o límite de sobre quiebre utilizando sólo perforación.	Debilitar la roca a lo largo de una línea definida, usando explosivos con bajo factor de carga.
Explosivos	Sin explosivos	Bajo factor de carga de explosivos (gr/ton).
Espaciamiento(m)	<1	1-2
Diámetros (in)	<6	6 ½ - 7 ½
Tipo de roca de uso	Mala-Media Calidad.	Competente.
Costos	Altos. Debido a la alta densidad de pozos.	Moderado.

### Estabilidad de Taludes y Pre corte

La técnica de *precorte* es ampliamente utilizada en minería a cielo abierto para controlar la geometría de los taludes, prevenir sobreexcavaciones y mejorar la estabilidad global. Se ha comprobado que delimitar con precisión el contorno final mediante una línea de precorte contribuye a:

- Reducir daños inducidos por tronaduras.
- Minimizar la sobre excavación, permitiendo una mejor conservación del mineral.
- Mejorar la estabilidad estructural de los bancos.
- Optimizar la seguridad y la vida útil de los taludes.

Los precortes al generar mayor estabilidad al talud, permiten modificaciones al ángulo interrampa, siendo estos más agresivos y con ello aumentar y optimizar la recuperación minera (Rebolledo, 2018).

Existen algunos modelos numéricos utilizados para calcular como afecta la tronadura y simular la distribución de esfuerzos en el talud, entre ellos se pueden identificar:

- FEM (Finite Element Method): Para simular distribución de esfuerzos en el talud.
- Rocscience Suite: Evaluación de daño por voladura (RS2, Slide, BlastSim).
- Software de tronadura (JKsimBlast, BlastCAD).

### **Estado del Arte: tronadura y cuidado de Talud.**

Las líneas de investigación actuales con respecto a la tronadura y cuidado de talud se centran en la optimización del rendimiento de la tronadura mediante el uso de modelos numéricos para predecir la fragmentación y el daño en la roca. Entre ellos se presentan:

*Análisis de campo lejano y cercano (Montalvan, 2022):* Evaluación de ondas sísmicas inducidas para minimizar PPV.

*Control con geófonos y sismógrafos:* Medición en tiempo real de vibraciones y ajuste de carga.

*Explosivos de carga dirigida:* Menor daño lateral y mejor definición geométrica del banco.

*Modelos numéricos integrados FEM+DDA (Catari et al, 2025):* Simulación deslizamientos post tronadura.

### **Perforación y tronadura en Chuquicamata y su importancia**

En la mina Chuquicamata se encuentran actualmente en explotación cuatro fases principalmente: Fase 49 Superior (F49S), Fase 49 Extendida (F49Ex), Fase 49 Intermedia Principal (F49IP) y Fase 38R. Cada una de estas fases presenta propiedades geológicas y geotécnicas particulares, cuya clasificación es realizada por la Superintendencia de Geotecnia a través del sistema de Unidades Geotécnicas de Talud de Banco (UGTB). Esta categorización tiene como propósito identificar el tipo de roca predominante en cada sector y establecer las condiciones de diseño para perforación y tronadura. Entre las principales unidades se encuentran: Pórfido Este Potásico (PEK), Pórfido Este Sericítico (PES), Pórfido Este Clorítico (PEC), Metasedimentos (MET), Granodiorita Elena Sur (GES), Lixiviado (LIX) Cuarzo igual Sericita (QIZ) y Cizalle Moderado (ZCM). La identificación de estas unidades constituye un dato de entrada esencial para la planificación operativa, ya que condiciona directamente la respuesta del macizo frente a los métodos de excavación (Polanco, 2016).

El proceso de perforación en Chuquicamata contempla tres tipologías principales de pozos: producción, buffer y precorte. En el caso de la perforación de producción, se utilizan equipos de gran envergadura, eléctricos, diseñados para lograr altos volúmenes de penetración y diámetros mayores. Para la ejecución de pozos de precorte y buffer, en cambio, se emplean equipos de menor tamaño, usualmente a motor diésel, que permiten una mayor maniobrabilidad y precisión en sectores donde se busca limitar el daño al macizo rocoso. Entre los equipos más representativos utilizados en la faena destacan los modelos DR 560 (Sandvik) para tareas de precorte y buffer, y los Pit Viper (Atlas Copco) para perforación de producción (Polanco, 2016).

Es importante señalar que las unidades litológicas actualmente en explotación corresponden, en gran medida, a sectores que en etapas anteriores de la vida del rajo fueron descartados debido a su baja ley de cobre frente a un escenario productivo más favorable. Hoy, la explotación de estas zonas impone un desafío técnico mayor, dado que en un mismo banco se presentan condiciones heterogéneas que requieren ajustes continuos en los parámetros de perforación y tronadura. Esta variabilidad, sumada al agotamiento progresivo de las reservas, resalta la necesidad de implementar estrategias de optimización y reducción de costos que permitan sostener la competitividad de la operación sin comprometer la seguridad geotécnica ni la eficiencia en la recuperación de mineral.

## 1.1 Prescindir de la tronadura de Precortes: Novedad, propuesta y contribución

Entendida esta realidad, y considerando la revisión bibliográfica presentada, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿En qué medida la omisión de la tronadura de precorte en la mina Chuquicamata puede considerarse una alternativa técnica y económicamente viable, sin comprometer la estabilidad geotécnica ni la eficiencia operacional de la explotación a cielo abierto?

En efecto, dada la evidencia empírica de casos donde se ha escogido realizar este tipo de tronaduras, en las cuales la perforación de precorte se ha efectuado, pero no se ha tronado, los resultados han sido satisfactorios bajo condiciones geotécnicas específicas, generando beneficios en el ahorro de tiempo de carguío de explosivos y del tipo económico.

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido la existencia de evidencia empírica obtenida en terreno, la cual demuestra resultados que justifican su análisis sistemático. Asimismo, se identifica un vacío de información formal dentro de la organización, ya que no existen registros documentados que evalúen de manera estructurada esta práctica.

En este sentido, se propone la realización de un análisis comparativo entre tronaduras ejecutadas con y sin la detonación del precorte, con el propósito de determinar los parámetros técnicos y económicos que definan las condiciones bajo las cuales puede considerarse una alternativa válida. En este sentido esta investigación contribuye no solo a llenar un vacío de conocimiento, y la expansión de la literatura sobre el tema, sino que también permite visibilizar y aprovechar los beneficios potenciales de la omisión de la detonación precorte en contextos específicos, cuando la evidencia disponible respalde su aplicación como una práctica eficiente y sostenible.

## 1.2 Objetivos de la investigación

Entendido lo anteriormente discutido, el objetivo general de este trabajo es evaluar los efectos asociados a la omisión de la tronadura convencional de precortes, identificando los beneficios y desventajas que dicha práctica conlleva, con el fin de evaluar su factibilidad técnica y económica y establecer los parámetros necesarios para su uso, de tal manera que pueda constituir una alternativa válida para su aplicación en futuros escenarios de explotación minera.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar los datos de tronaduras efectuadas durante el periodo enero-abril 2025; considerando UGTB, fase donde ocurrió el evento, líneas reales de quiebre obtenidas, recuperación de material real vs programa, registro de daños obtenidos en equipos de extracción.
- Analizar los resultados obtenidos mediante una validación cruzada entre variables operacionales como: disponibilidad física de los equipos de extracción, recuperación volumétrica, granulometría, cuidado de talud, línea de programa alcanzada y los resultados por tronadura.
- Estimar impactos económicos en la realización de la técnica, comparando valores USD/m de cada alternativa.
- Establecer factores determinantes para la aplicación del método de detonación, de tal manera de convertirlo en una alternativa viable.

## 2 Metodología

**Paradigma y diseño de investigación:** La siguiente investigación se enmarca en el paradigma cuantitativo o empírico -analítica, fundamentada en el enfoque del tipo clásico positivista, en el cual utiliza como propio los métodos de las ciencias físico - naturales (Binda & Balbastre-Benavent, 2013). Este enfoque se introduce en un proceso lógico en el cual considera en primera instancia los conceptos existentes y se somete a prueba una hipótesis mediante el diseño de algún experimento o método de investigación rigurosamente elaborado; en el cual sus resultados confirmarán o refutarán dicha hipótesis, obligando al usuario a la iteración hasta lograr encontrar una explicación para el fenómeno en cuestión, de esta forma elaborando una teoría o rechazándola.

El diseño de investigación adoptado corresponde a un diseño cuasi-experimental de tipo comparativo, basado en la observación de dos condiciones de interés: tronaduras con detonación de precorte y tronaduras sin detonación del precorte. Debido a la imposibilidad de controlar por completo el entorno en una operación minera de gran escala como Chuquicamata, se optó por trabajar con datos históricos y registros empíricos provenientes de diferentes fases de explotación. El diseño comparativo es especialmente útil en este caso, ya que permite observar variaciones en múltiples unidades litológicas y contextos geotécnicos, estableciendo criterios sobre la conveniencia de aplicar o no la técnica de detonación del precorte.

Por lo tanto, la metodología cuantitativa no sólo investiga, examina, compara, describe o trata de entender el fenómeno en estudio, sino que busca efectuar inferencias a partir de datos obtenidos de muestras de una población, relacionando distintas variables de dicha muestra. Así, empleando análisis estadísticos, el objetivo de la investigación cuantitativa pasa a ser la identificación de patrones que caractericen a la población (Binda & Balbastre-Benavent, 2013).

**Datos con los que se efectuó el estudio:** En la investigación cuantitativa, los datos se obtuvieron a partir de los análisis resultantes de las tronaduras con y sin la detonación de los precortes, lo que se denomina un método del tipo ex post -Facto (Rodríguez & Valldeoriola, 2014). Este estudio se basa en los datos que provienen de registros técnicos recopilados en la operación del rajo abierto Chuquicamata, los cuales fueron seleccionados considerando su pertinencia para evaluar el impacto de la omisión de la tronadura de precorte en distintas fases de explotación durante el periodo Enero -abril 2025. La información empleada incluye, antecedentes asociados a parámetros geotécnicos, operacionales, económicos y de desempeño de equipos, permitiendo una caracterización integral del fenómeno en análisis. Dentro de las variables de tipo geotécnico se contempló la valoración de la pared resultante como: Logrado y requerimiento de Full Control, así como la identificación de fenómenos de sobre quiebre. En el ámbito operacional, se incorporaron indicadores de fragmentación y productividad de carguío, mientras que en la dimensión económica se consideraron los costos asociados por tonelada tronada y la recuperación efectiva de mineral programado. De manera complementaria, se incluyeron registros vinculados a las condiciones de los equipos de carguío, particularmente aquellos relacionados con daños en baldes ocurridos en sectores donde se omitió la aplicación de precorte. En conjunto, la disponibilidad de una base de datos amplia y detallada favoreció la aplicación de herramientas estadísticas robustas, otorgando confiabilidad a las inferencias realizadas y fortaleciendo la validez de las conclusiones alcanzadas en la investigación.

**Entorno de la Investigación:** El estudio cuantitativo se llevó a cabo en la mina a rajo abierto Chuquicamata, Calama, región de Antofagasta. La investigación se enfocó en sus cuatro fases: **F49S**, **F49Ex**, **F38R** y **F49IP**, cada una con características particulares en cuanto a geometría, leyes y condiciones de macizo rocoso. La diversidad de contextos litológicos en estas fases ofreció una oportunidad única para comparar la influencia de la ausencia de detonación de precorte en distintos escenarios. Esta heterogeneidad incrementa la validez externa de los hallazgos, permitiendo extrapolar conclusiones a situaciones similares en otras operaciones de minería a cielo abierto.

La recolección de datos con respecto a líneas de conciliación, cuidado de talud y granulometría, fueron obtenidos a partir de los análisis efectuados por el área de Geotecnia y personal de tronadura Enaex, ambos a su vez recogidos de manera digital y en terreno durante el periodo enero 2025-abril 2025. Por otro lado, se analizó la confiabilidad de los equipos de extracción post evento de tronadura, mediante la utilización de datos e información recopilada por la Superintendencia de Mantenimiento Mina, durante el periodo de tiempo antes mencionado.

**Intervenciones e instrumentos:** La investigación cuantitativa se limitó al ámbito del análisis documental y estadístico, dado que el estudio se desarrolló a partir de información secundaria generada en el contexto de la operación minera. No se efectuaron modificaciones directas sobre los procesos productivos, sino que se trabajó con bases de datos oficiales, reportes técnicos y registros operacionales correspondientes a distintas fases de explotación del rajo abierto Chuquicamata, dentro de los primeros 4 meses del año en curso. Este enfoque permitió resguardar la continuidad operacional y la seguridad de la faena, al mismo tiempo que aseguró la objetividad de los resultados, en tanto se basaron en datos reales obtenidos bajo condiciones normales de operación. Lo anterior, va en directa relación con los métodos propios del enfoque cuantitativo en el cual se destaca: la *Observación Cuantitativa*; colección objetiva de datos que se centra en números y valores, representados en términos de cantidad. Los resultados que se obtienen de la observación son producto de la utilización de métodos de análisis estadísticos y numéricos (Cárdenas, 2018). Las ventajas de este método radican en su: precisión, constancia en sus resultados, resultados sin sesgo, investigación científica, resultados numéricos, fiabilidad de resultados (Cárdenas, 2018). De manera simultánea se empleó, la *Revisión de documentos o investigación documental*; la revisión de documentos corresponde a una técnica de investigación en la cual se revisa la documentación histórica de la empresa con respecto al foco de estudio en cuestión (Suck & Rivas-Torres, 1995). Las ventajas de realizar esta técnica es que es posible efectuar una base de datos donde se recolecten las fuentes de información y eventos anteriores, por este motivo, se genera la posible alternativa de verificar las conclusiones obtenidas en la investigación.

En cuanto a la intervención o al tratamiento de la información, se emplearon diversos instrumentos de análisis. En primera instancia, se utilizaron bases de datos y planillas de cálculo estructuradas, que facilitaron la organización de las variables geotécnicas, operacionales y económicas según fases y unidades litológicas. Se aseguró la estandarización del proceso de análisis de datos fijándose en las siguientes variables que constituyen el sistema QA/QC propio de personal de tronadura, estado Full Control del equipo geotécnico e información de operaciones mina, entre ellos se tiene:

- Conciliación topográfica.
- Unidad Geológica de Talud de Banco (UGTB).
- Valoración geotécnica, cuidado de talud.
- Granulometría obtenida.

- Cantidad de explosivo utilizado.
- Costo tronadura.
- Disponibilidad física (DF) y de equipos de extracción asociados con la recuperación de material.
- Recuperación de material (%).

Los datos anteriores fueron examinados y tratados mediante los siguientes softwares:

- Microsoft Excel; Módulo Análisis de Datos.
- Autocad.

En conjunto, estas intervenciones e instrumentos conformaron un marco metodológico sólido, garantizando que el análisis de los impactos de no efectuar la tronadura de precorte se realizara con un alto grado de precisión, replicabilidad y validez científica.

**Plan de análisis de los datos:** La investigación cuantitativa exige el uso de técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales para la interpretación de los resultados (Rodríguez & Valldeoriola, 2014). En una primera instancia, se procedió a la caracterización general de las variables mediante estadística descriptiva, considerando medidas de tendencia central y dispersión con el propósito de obtener una visión preliminar del comportamiento de los datos en cada fase y unidad litológica. Con el objeto de analizar de manera más integral la interacción de factores, se empleó un análisis de varianza (ANOVA), el cual posibilitó contrastar simultáneamente el efecto de la litología, la fase de explotación y la condición de tronadura sobre variables dependientes como la sobre excavación, condición geotécnica y la fragmentación. A modo de poder reflejar de mejor manera los resultados, se utilizaron gráficos del tipo histograma, regresiones y circulares en los cuales se muestren de mejor manera las tendencias relevantes para los objetivos de la investigación (Binda & Balbastre-Benavent, 2013). Este plan analítico permitió construir un marco interpretativo sólido, desde el cual fue posible inferir con rigor los impactos asociados a la omisión de precortes, diferenciando las condiciones en que dicha práctica resulta operativamente viable de aquellas en que genera consecuencias adversas para la estabilidad y eficiencia de la operación minera.

**Ética:** El estudio cuantitativo se elaboró respetando la integridad correspondiente del método, esto es, la objetividad. Tal como establece el método científico, los resultados son accesibles para todo investigador que esté interesado en el desarrollo de este trabajo, replicables y objetivos (Rodríguez & Valldeoriola, 2014). La información ocupada en esta investigación fue tratada con sumo cuidado, respetando los límites establecidos por cada responsable de área para su correcta privacidad, sin exponer datos delicados que comprometan el desarrollo de las actividades que se efectúan en División Chuquicamata.

Por otro lado, toda empresa involucrada que facilitó información a la investigación, se le solicitó autorización para su correcta manipulación, cumpliendo con los protocolos de privacidad correspondientes indicando los objetivos académicos de ésta (Codelco, 2025).

### 3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los distintos instrumentos utilizados para este estudio. Los datos fueron divididos en 3 áreas para su mejor comprensión, éstas son: Planificación y Geotecnia, Operaciones Mina y Tronadura.

#### Generalidades

De un total de 31 tronaduras realizadas durante el periodo Enero-Abril 2025, el análisis se concentró en 21 eventos realizadas en las cuatro fases, dado que contaban todas ellas con la perforación de precorte. Con el propósito de controlar la variabilidad asociada a las características anisotrópicas y heterogéneas del macizo rocoso en cada fase, se optó por generalizar las unidades geotécnicas de talud de banco (UGTB) predominantes, de modo que cada fase quedara representada por la unidad litológica de mayor presencia y relevancia operacional. Esta decisión metodológica facilita la comparación entre escenarios y la interpretación de resultados, sin perder la coherencia geotécnica requerida para el análisis.

Las UGTB de referencia para cada fase, utilizadas en las evaluaciones, se presentan en la tabla II:

Tabla II: UGTB predominantes en cada fase de Dch (Fuente Elaboración Propia).

Fase	UGTB (Predominante)
49S	PEC/PEK/PES
49EX	GES/MET
38R	QIZ/ZCM
49IP	PEK/PES

Por otro lado, la información obtenida fue clasificada en los dos focos de estudio: perforación de precorte con/sin detonación, cuyo análisis se presenta a continuación.

#### Planificación y Geotecnia

El primer análisis corresponde a la comparación general entre la diferencia obtenida real post tronadura con la realización de precortes pero sin tronarlos, donde, las distancias en negativo significan sub quiebre o que no llegan a alcanzar la línea planificada o de programa (LP).

La figura 2, muestra la diferencia entre la línea de cresta de talud resultante en los casos de haber/no haber tronado los precortes, con respecto a las líneas de cresta por diseño minero planificado, lo que se denomina *conciliación topográfica*. Tal como se aprecia en la Figura 2, las tronaduras en las cuales se trona el precorte, la diferencia con la línea de diseño resulta en promedio 1.1 m, sin considerar la extracción. Para el caso de no tronar precortes esta diferencia es de 3.4m. La Figura 3, clasifica ambas técnicas según los registros obtenidos durante el periodo de estudio en las 4 fases de observación.

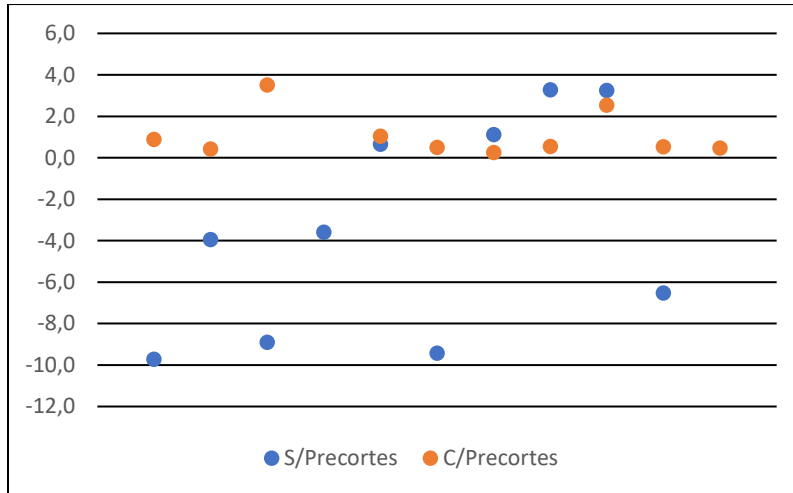


Figura 2: Conciliación topográfica para los 2 casos de estudio. Diferencia en metros (Fuente: Elaboración Propia).

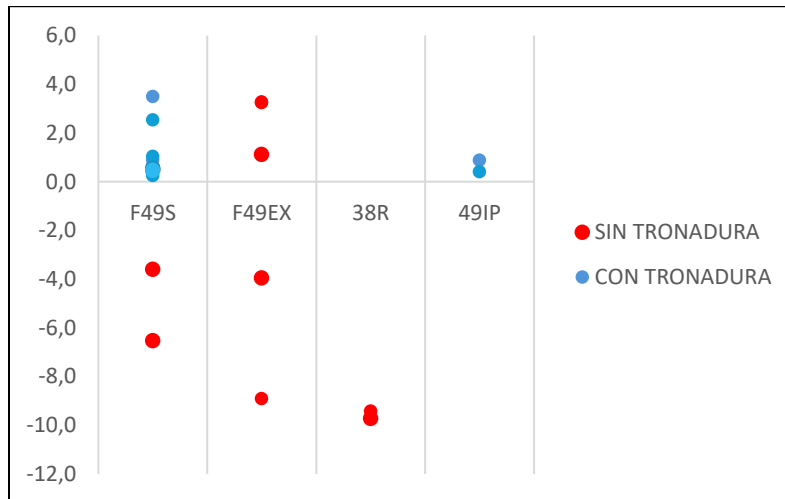


Figura 3: Conciliación topográfica por fase para los 2 casos de estudio (Fuente: Elaboración Propia).

En términos generales, de las figuras 2 y 3, se desprende que las tronaduras en las cuales se detonaron los precortes, las diferencias con respecto a la línea de programa tuvieron un promedio de  $1,1\text{m} \pm 1$  de diferencia, siendo la fase 49IP la que contienen la menor diferencia  $0,6\text{m} \pm 0,5$ . Por su parte en las cuales no se tronaron los precortes, el promedio fue de  $5\text{m} \pm 3,4\text{m}$ . Siendo la Fase 38R la que presenta mayor diferencia con respecto a su programa planificado.

### Valoración geotécnica.

El control geotécnico se basa en la valoración post tronadura y extracción, lo que denomina Full Control, y posee dos parámetros fundamentales: Factor de diseño (Fd) y Factor de Condición (Fc). El primer parámetro consiste en la corroboración del diseño propiamente tal del banco o talud, esto es: altura, ángulo cara de banco, ancho de berma, línea de programa. Por otro lado, el factor de condición indica el estado final del talud o pared post extracción: condición de medias cañas, medias cañas, grietas inducidas post tronadura, condición de discontinuidades menores, presencia de bloques,

geometría del talud y condición cresta del talud. Los puntos anteriores son clasificados según su grado de cumplimiento. Para ambos criterios se analizó en cada fase, en función del periodo de estudio (figura 4).

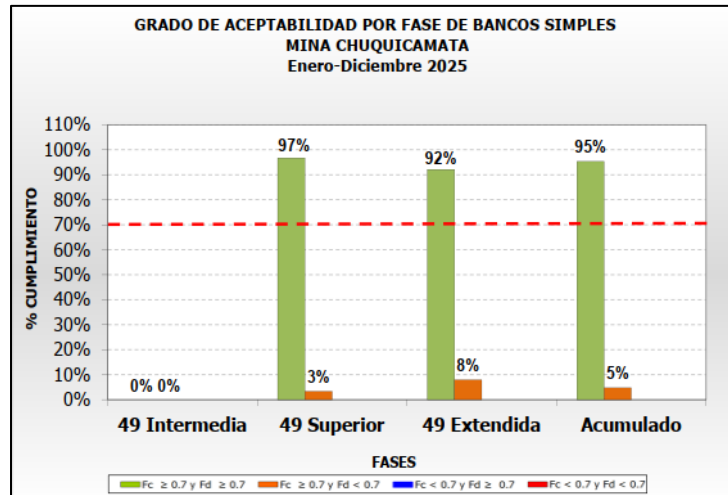


Figura 4: Grado de Aceptabilidad por Fase. Acumulado 2025 (Fuente: GRMD Codelco Dch, Spcia Geotecnica)

La figura 5 muestra el cumplimiento de los factores de diseño. Como se muestra, en términos generales existe un cumplimiento del factor de diseño en las fases trabajadas durante el primer cuarto del año (tabla III).

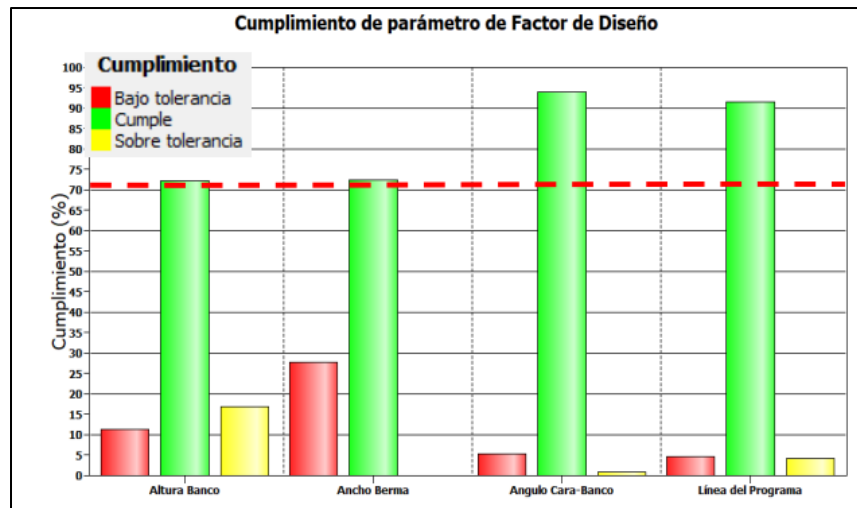


Figura 5: Cumplimiento de Parámetros de Factor de Diseño Enero Abril 2025 (Fuente: GRMD Codelco Dch, Spcia Geotecnica).

En términos generales, luego de la tronadura y carguío de banco, hay un alto porcentaje asociado a cumplir con un porcentaje mayor al 70% en Fc y Fd para las 4 fases en cuestión.

### Operaciones Mina

El foco de la operación mina, además de extraer lo que está comprometido por plan minero, corresponde al cuidado de los activos mineros, en este caso, carguío. Considerando lo anterior, las

tablas IV y V, muestran los datos correspondientes al registro de los daños a equipos de extracción, esto es: palas de cable y palas hidráulicas, asociados a problemas de desgaste en el balde durante el periodo de tiempo de estudio. El tiempo total se asume como tiempo fuera de plan de mantenimiento (tiempo correctivo en horas).

Tabla III: Resumen enero-abril con porcentaje de aceptabilidad Fc/Fd (Fuente: Elaboración Propia).

Mes	Fc	Fd	Avance (m)	Fc $\geq$ 0,7 Fd $\geq$ 0,7	Fc $\geq$ 0,7 Fd $<$ 0,7	Fc $<$ 0,7 Fd $\geq$ 0,7	Fc $<$ 0,7 Fd $<$ 0,7
Ene	0,80	0,87	403	100%	0%	0%	0%
Feb	0,88	0,79	421	90%	10%	0%	0%
Mar	0,81	0,83	546	92%	8%	0%	0%
Abr	0,81	0,9	407	100%	0%	0%	0%

Tabla IV: Resumen tiempo fuera de servicio por fase (Fuente: Elaboración Propia).

Tiempo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Total
200	2:17:00	3:46:00	1:16:00		7:19:00
230	0:27:00	0:52:00	4:00:00	2:34:00	7:53:00
890	1:51:00	5:22:00			7:13:00
893	0:03:00	0:27:00	1:58:00	1:29:00	3:57:00
894	83:24:00	1:28:00	0:56:00	1:16:00	87:04:00
				<b>Total</b>	<b>113:26:00</b>

Cabe mencionar que las palas 200/230, corresponden a palas de cable y las unidades 890,893,894 a equipos diésel o hidráulicos.

Tabla V: N° eventos ocurridos fuera de programa por equipo de carguío (Fuente: Elaboración Propia).

Cantidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Total
200	3	5	1		9
230	4	2	5	2	13
890	3	4			7
893	1	1	1	2	5
894	4	5	1	1	11
				<b>Total</b>	<b>45</b>

Tabla VI: Ubicación equipos de carguío durante los meses de estudio (Fuente: Elaboración Propia).

Fase	Enero	Febrero	Marzo	Abril
38R	893	893	893	893
49IP				
49S	894/200/230	894/200/230	894/200/230	890/200
49EX				230

La tabla VI muestra la ubicación de los equipos en las distintas fases para el periodo de estudio. Tal como se observa, el único cambio fue que la excavadora 890 reemplaza a la pala 230 en la Fase 49S y la pala 230 empieza a abrir banco en la Fase 49Ex.

Para poder efectuar una comparación a modo de poder visualizar si existe algún cambio con la metodología de tronadura implementada, se muestra lo siguiente:

Tabla VII: Comparación tiempos fuera de servicio ambas flotas de equipos, mismo periodo 2024/2025 (Fuente: Elaboración Propia).

	2024	2025
<b>Tiempo Total (hrs)</b>	37:51:00	115:13:00

De la tabla VII, se puede apreciar un aumento más que sustancial, más de un 300%, en las fallas registradas para los mismos equipos en los diferentes años.

### Recuperación Mina

A modo de simplificar el análisis de los resultados obtenidos, se utilizó como supuesto inicial que existen similares cualidades en la operación de arranque de material de los bancos explotados para los dos tipos de equipos de carguío principales, por lo que la forma de extracción de material no es un factor de estudio y sólo se enfocó en el volumen recuperado vs planificado.

Tabla VIII: Comparación Tonelaje programado vs extraído real (Fuente: Elaboración Propia).

	Programa	Precorte	Real	Diff %
<b>49S</b>	11.439.000	5.319.135	5.425.518	102%
<b>49EX</b>	3.808.000	1.218.560	1.207.349	99%
<b>38R</b>	1.363.000	1.022.250	1.283.946	126%
<b>49IP</b>	810.000	810.000	810.000	100%
<b>Total</b>	17.420.000	8.369.945	8.726.813	104%

La tabla VIII resume los tonelajes asociados en cada fase entre Enero-Abril 2025. A su vez, en la columna *Precorte* se clasificaron todos los polígonos o volúmenes asociados a tronaduras que conlleven la perforación de precorte, independiente si se hayan tronado o no, dado que la decisión de realizar la detonación de esos pozos no va por programa de planificación, sino decisiones operacionales y controles diarios realizados por área de PyT y geotecnia.

Los datos señalan que se extrajo un +4% de tonelaje de lo programado para cada fase. De ellas, la Fase 38R es la que se logra recuperar un 26% más.

### Tronadura

#### Granulometría

Los datos indican que, la granulometría de la tronadura, no se ve impactada de gran manera con la realización de la tronadura de precorte. Esto se debe a que, como son pozos que por secuencia se inician en primera instancia apegadas al talud, la granulometría siempre irá definida por los pozos de buffer y producción. La Tabla IX indica los resultados de la granulometría P80 promedio obtenida para cada una de la granulometría para sus modalidades con/sin tronadura.

Por otro lado, la Figura 6 muestra los resultados promedio para tronaduras del tipo mineral, en la cual se observa que, en términos generales, la granulometría se mantiene constante independiente de la fase, uso de precorte y explosivos.

Tabla IX: Granulometría obtenido para ambos casos (Fuente: Elaboración Propia).

Granulometría			
Fase	P80 (in) con tronadura	P80 (in) sin tronadura	Diff (%)
49S	4.8	4.8	0
49EX	4.6	4.9	+6.5
38R	4.09	4.10	+0.2
49IP	4.5	4.6	+2.2
Prom	4.5	4.6	+2.2

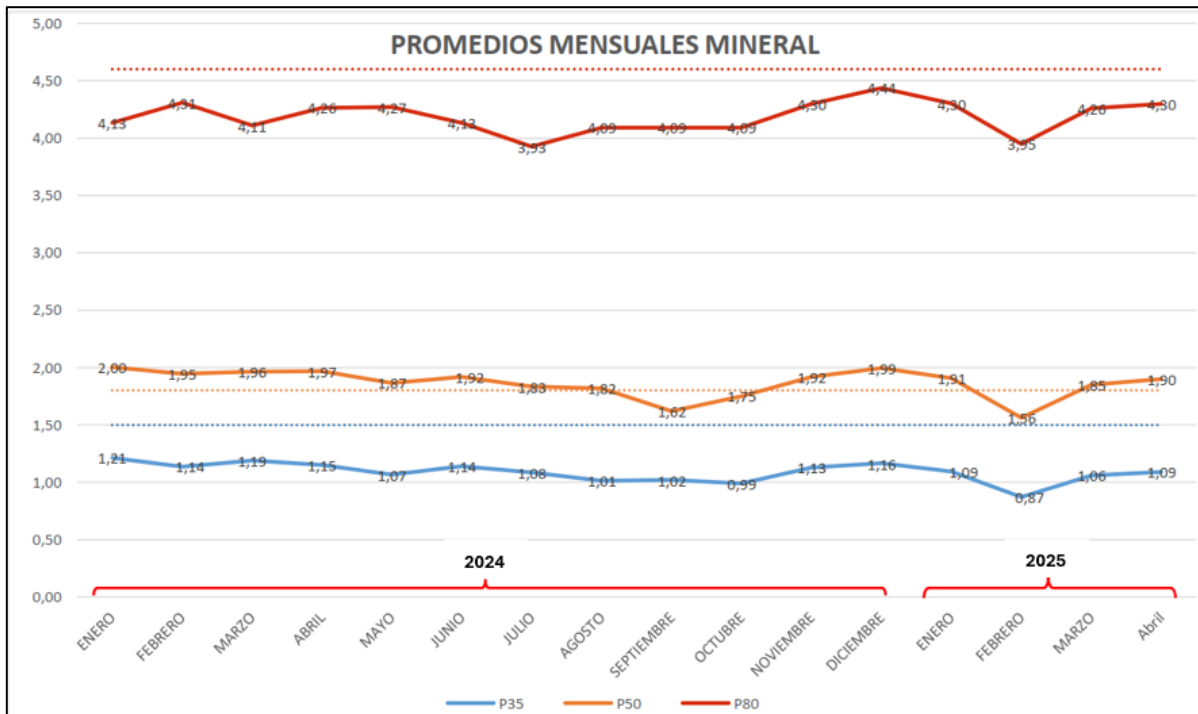


Figura 6: Granulometrías obtenidas 2024/25 (Fuente: Enaex).

Tal como se muestra en la tabla VIII, la diferencia entre los resultados de la fragmentación por tronadura es de un 3% alcanzando un valor promedio de  $4.2 \pm 0.5$  in.

### Costos tronadura

Uno de los aspectos más relevantes son los costos incurridos al carguío de pozos con explosivos. Para poder realizar una comparación adecuada y entendible, se promediaron las cantidades de tronaduras realizadas independiente de las distintas mallas de perforación esto utilizadas, esto es: 9x10 y 5x6. Además no fueron considerados algunas variables que influyen en el costo de tronadura, esto es: no se consideró el costo de administración, remuneraciones, camiones, traslado etc, dado que es un costo fijo para este estudio, tampoco se consideró 2 casos dentro del estudio en los cuales había agua, que si bien no varía sustancialmente el costo de tronadura, si es un elemento que debe ser estudiado aparte y tampoco se considera en costo en aceros o costo de perforación dado que los desgastes en forma unitaria no varían.

Tabla X: Costos tronadura por tipo de perforación (Fuente: Elaboración Propia).

	USD/m	USD	Diámetro Perforación
Pre Corte	\$15	218	7 ½"
Buffer	\$19	342	7 ½"
Producción	\$20	360	12 ½"

Como se puede apreciar en la tabla X, el costo de tronar precortes es menor en cuanto al metro tronado. No obstante, se debe considerar la economía de escala en estos casos, dado que, al poseer un diámetro menor de perforación, el desgaste en aceros es mayor y se requiere mayor cantidad de pozos dependiendo de la zona a tronar. Por otro lado, un aspecto relevante en los precortes es que a diferencia de los pozos de buffer o producción, éstos no pueden ser cargados días anteriores, o sea, tener carguío adelantado, deben ser cargados el mismo día de la tronadura, por lo que limita la cantidad de pozos a cargar la cual está en 250/día aproximadamente.

*Costos Beneficios de tronar precortes.*

A modo de poder ejemplificar los beneficios de precortes, se utilizará una de las tronaduras analizada en el periodo de estudio. La tabla XI, corresponde a los datos de una tronadura real ocurrida en la Fase 49S y, representa un valor promedio a considerar dada las limitaciones de tonelaje máximo a tronar permitido por el área de geotecnia.

Tabla XI: Costo beneficio de tronar precortes. Tronadura 08-03-2025 (Fuente: Elaboración Propia).

<b>FECHA</b>	08-03-2025
<b>FASE</b>	F49 superior
<b>PALA</b>	200
<b>MALLA</b>	2_3_2716
<b>PROFUNDIDAD</b>	18
<b>DENSIDAD</b>	2,61
<b>POZOS 7 1/2</b>	333
<b>POZOS 12 1/4"</b>	66
<b>PRECORTES</b>	43
<b>TIPO EXPLOSIVO</b>	Vertex 970
<b>CANTIDAD</b>	246.620
<b>TONELAJE APROX.</b>	650.000

La tabla XI toma un carácter relevante dado que representa de buena manera una tronadura típica del rajo Chuquicamata y además que la fase donde se realizó, corresponde al foco de crecimiento para el año 2026 como plan anual. La tabla XII muestra un análisis comparativo entre tronar precortes y prescindir de ellos.

Tabla XII: Posibles beneficios de prescindir de la detonación de precortes (Fuente: Elaboración Propia).

<b>Beneficios Económicos</b>	<b>Con tronadura</b>	<b>Sin Tronadura</b>
<b>Costo Total (USD)</b>	\$134.550	\$122.940
<b>Ahorro (USD)</b>	\$11.610	
<b>Ahorro (%)</b>	8,6%	

### 3.1 Análisis de los resultados

A continuación, las tablas XIII y XIV muestran los supuestos estadísticos para el análisis ANOVA, entre todos los datos obtenidos, independiente de la fase de estudio, con precortes tronados y no tronados.

Tabla XIII: Datos entrada ANOVA (Fuente: Elaboración Propia).

Precortes		
	No Tronados	Tronados
<b>Total</b>	10,0	10,0
<b>Suma</b>	-33,8	10,7
<b>Promedio</b>	-3,4	1,1
<b>Varianza</b>	26,9	1,2

Para validar los datos en los casos de precortes tronados y no tronados se utilizaron prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. La tabla XIV resume los datos para el caso de precortes no tronados (Alpha =0.05).

Tabla XIV: Validación mediante Shapiro-Wilk (Fuente: Elaboración Propia).

Estadígrafos	No tronados	Tronados
Valor P	0.1594	0.00127
Valor W	0.8876	0.7131

Como se puede observar para el caso de los pozos tronados, la distribución no presenta una forma normal. Lo anterior se muestra en las figuras 7 y 8 para No tronados y tronados respectivamente.

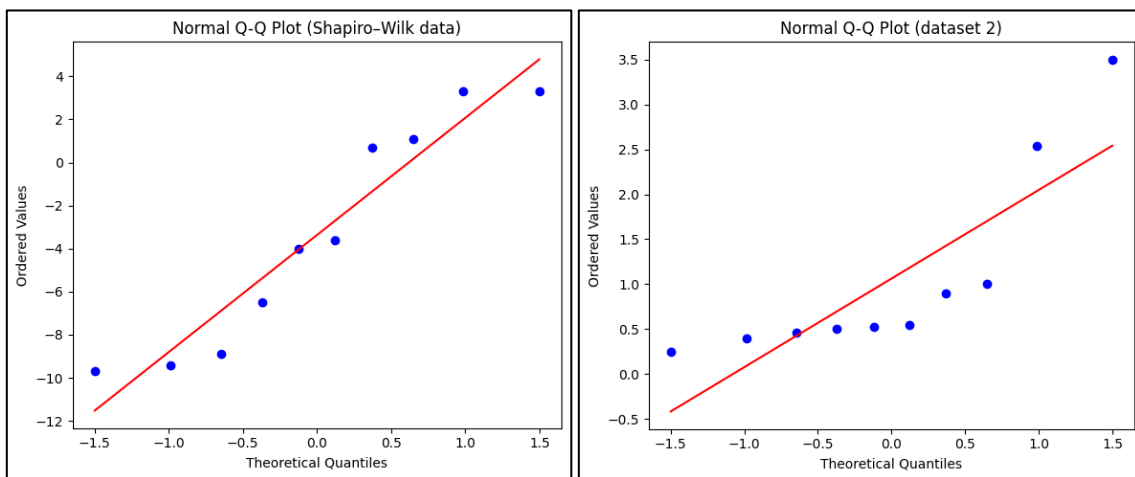


Figura 7 y 8: Distribución normal mediante utilización método Shapiro Wilk (Fuente: Elaboración Propia).

Al observar la tabla XIV se indica que la varianza para el caso de tronar precortes es bastante alta en comparación de tronar precortes. Esto es tiene sentido si se considera el aspecto geológico característico de cada talud o banco, al poseer atributos de heterogeneidad y anisotropía se puede asumir que los datos son normales a la realidad de una faena minera. Ahora bien,

*Tabla XV: Resultados ANOVA (Fuente: Elaboración Propia).*

ANOVA	Entre grupos	Dentro del grupos
Suma de los cuadrados	98,97	252,80
Grados de libertad	1,00	18,00
Promedio de los cuadrados	98,97	14,04
Valor F	7,05	
Probabilidad	0,02	
Valor Critico F	4,41	

El análisis estadístico mediante un modelo ANOVA de un factor permitió evaluar la relación entre la aplicación de la tronadura de precorte y no realizarla. En general, considerando solamente los datos clasificados en Tronadura Efectuada y no Efectuada, los resultados muestran que el valor F obtenido es mayor al valor F crítico ( $7,047 > 4,414$ ) de lo cual se concluye que ambas técnicas son estadísticamente distintas.

Ahora bien, es importante destacar que la tabla XV muestra resultados enfocados en todos los datos obtenidos a modo de poder identificar a grandes rasgos que tipo de diferencias hay entre ambas poblaciones. Lo correcto es comparar en igualdad de condiciones, o en este caso en el mismo banco, talud o UGTB presente. La tabla XV compara los resultados de la aplicación de ANOVA para ambos casos en la Fase 49S y fueron tratados de modo de comparar en términos similares la información.

*Tabla XVI: Datos entrada para ANOVA en Fase 49S (Fuente: Elaboración Propia). Tabla XIII: Datos entrada para ANOVA en Fase 49S (Fuente: Elaboración Propia).*

Precortes	No Tronados	Tronados
Total	3,0	9,0
Suma	-9,5	28,8
Promedio	-3,2	3,2
Varianza	13,0	38,3

Tabla XVII: Resultados ANOVA Fase 49S (Fuente: Elaboración Propia).

ANOVA	Entre grupos	Dentro del grupos
Suma de los cuadrados	90,92	332,15
grados de libertad	1,00	10,00
Promedio de los cuadrados	90,92	33,22
F	2,74	
Probabilidad	0,13	
Valor Critico F	4,96	

No obstante, al comparar la Fase 49S, la cual posee ambos tipos de eventos, se obtiene que  $F < \text{Crítico}$ , esto es,  $2,7374 < 4,9646$ , por lo que estadísticamente nos señala que la hipótesis nula es correcta, o sea, estadísticamente tronar los precortes y no hacerlo no genera mayor variabilidad en los resultados. Lo anterior expuesto, se coincide con las UGTB predominante en la fase esto es: PEC, PEK, PES.

En términos de Operaciones Mina, específicamente con respecto a la disponibilidad de los equipos mineros, el tratamiento estadístico de los datos disponibles, a través de pruebas de comparación de medias y análisis exploratorios para todos los datos (incluyendo intervalos de confianza al 95%), no permite establecer una relación concluyente entre la ausencia de precorte y la ocurrencia de daños en los baldes de los equipos de carguío. Si bien algunos registros sugieren una mayor frecuencia de incidentes en escenarios sin precorte, las diferencias observadas no alcanzan significancia estadística ( $p > 0,05$ ), lo que impide validar la hipótesis de manera robusta. Ahora bien, realizando una inspección a los datos sobre la cantidad de eventos que dejan a los equipos fuera de servicio con respecto a tronaduras que no consideren pre corte, se observa cierta correlación de datos, la Figura 7 muestra dicha relación.

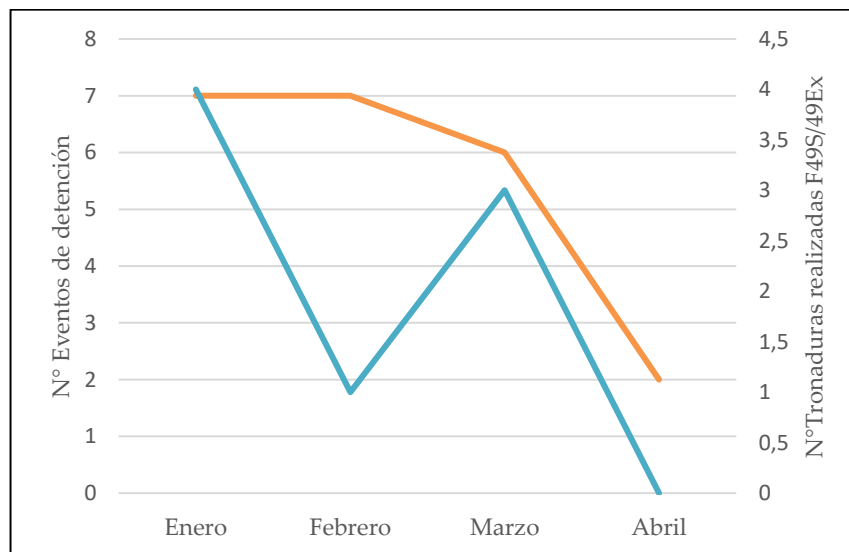


Figura 9: Relación Eventos de mantención vs Tronaduras sin pre corte F49S/49Ex. (Fuente: Elaboración Propia).

Con un simple análisis de correlación entre ambas variables, se puede constatar que el valor de coeficiente de Pearson es de 0,69, lo que implica cierta relación entre las mecánicas y las tronaduras realizadas, con especial énfasis en las Fases 49S y Fase 49Ex.

Ahora bien, si se analizan los datos en su conjunto se tiene que, bajo la información actualmente disponible, no existe evidencia suficiente para afirmar que el no efectuar la tronadura de precorte se constituya como un factor determinante en los daños reportados. Sin embargo, la dispersión de los datos y la limitada cantidad de casos analizados dejan abierta la posibilidad de una correlación, la cual podría hacerse más evidente bajo un diseño experimental con mayor profundidad y control de variables operacionales.

En consecuencia, se reconoce que, aunque los datos actuales no corroboran la hipótesis planteada, se requiere un estudio más amplio que incorpore series temporales extensas, caracterización litológica más detallada y un control riguroso de condiciones operativas para establecer con mayor certeza la relación entre daño en equipos y ausencia de precorte.

En lo que respecta al cumplimiento de las líneas de programa y al cuidado del talud, el análisis evidencia que la decisión de no efectuar la tronadura de precorte en sectores dominados por las unidades geotécnicas PEC, PEK y PES resulta operacionalmente conveniente, dado que estas litologías presentan un buen comportamiento estructural y mantienen un adecuado control geométrico aun sin la aplicación de dicha técnica.

*Tabla XVIII: Diferencia Línea de Programa obtenida vs UGTB predominante por fase. No considera tronadura de precorte (Fuente: Elaboración Propia).*

<b>Fase</b>	<b>UGTB (Predominante)</b>	<b>Diff LP (m)</b>
49S	PEC/PEK/PES	3,6
49EX	GES/MET	4,1
38R	QIS/ZCM	9,5

La tabla XVIII, indica claramente según UGTB y fase los resultados obtenidos pueden variar hasta en 5 m, sin embargo, para la Fase 49S en la cual tenemos tronadura y prescindimos de ella, los resultados son bastante satisfactorios. No obstante, esta generalización no puede ser realizada para el resto de las fases, esto pues presentan características intrínsecas que impiden tronar precortes. La tabla XIX muestra un resumen con las características principales de cada una de las UGTB.

Las fases 38R y 49Ex, poseen parámetros geotécnicos que indican una roca más débil y por ende el extremo cuidado en el uso de los precortes. Esta diferencia sugiere que la decisión de aplicar o no la tronadura de precorte debe ser evaluada caso a caso, considerando no solo los aspectos técnicos de estabilidad, sino también el impacto directo en la recuperación económica del recurso (tabla XVI).

Las figuras 10 y 11 muestran en detalle la dispersión de los datos para los casos Sin Tronadura de precortes (S.T.) y Con Tronadura (C.T).

Tabla XIX: Parámetros geotécnicos principales por UGTB (Fuente: Elaboración Propua).

UGTB	ff/m	IRS (Mpa)	GSI	IT	Densidad
PEC	2--8	100-200	60-65	65-70	2,63
PEK	2--6	100-140	50-60	58-64	2,61
PES	2--6	70-100	50-55	56-62	2,63
GES	4--6	100-120	50-55	60-62	2,67
MET	4--8	40-70	40--50	45--50	2,67
QIS	4--6	70-80	45-50	56-58	2,71
ZCM	13-14	25-30	20-30	30-35	2,48

Tabla XX: Diferencia Línea de Programa obtenida vs UGTB total. (Fuente: Elaboración Propia).

Precortes	Sin tronar	Tronados
Promedio	-3,4	1,1
Error Estándar	1,6	0,3
Mediana	-3,8	0,5
Desviación Estándar	5,2	1,1
Varianza Muestral	26,9	1,2
Rango	13,0	3,3
Mínimo	-9,7	0,3
Máximo	3,2	3,5
Sumatoria	-33,8	10,7
Total	10,0	10,0

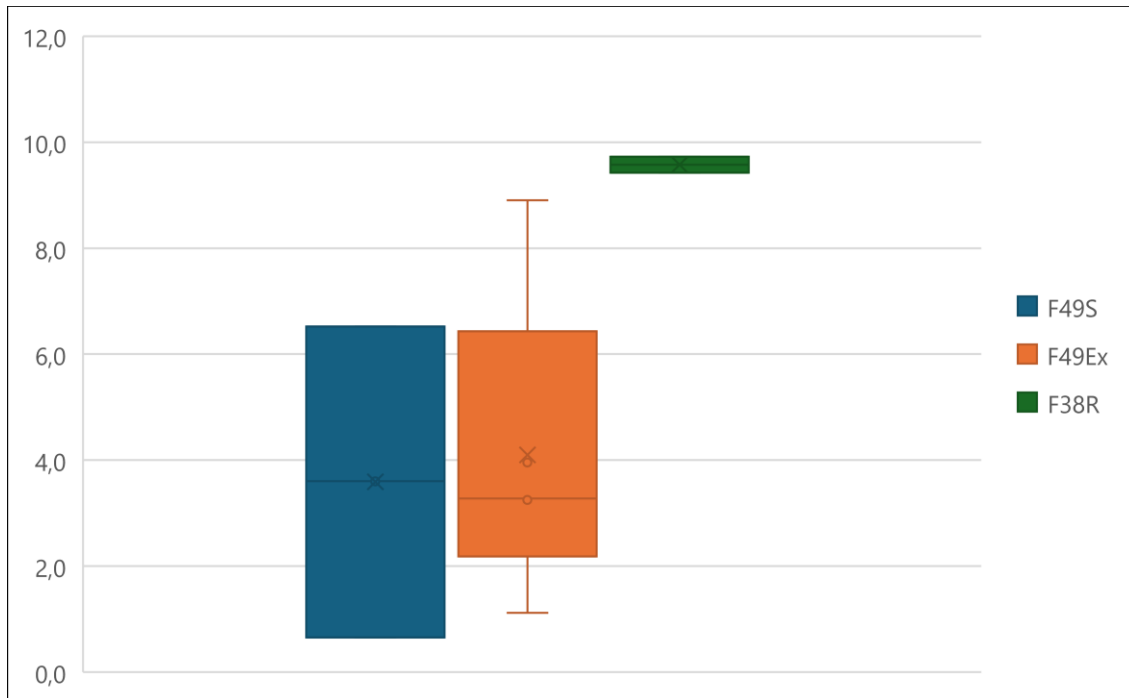


Figura 10: Boxplot caso S.T. para las distintas fases. Fuente: Elaboración Propia

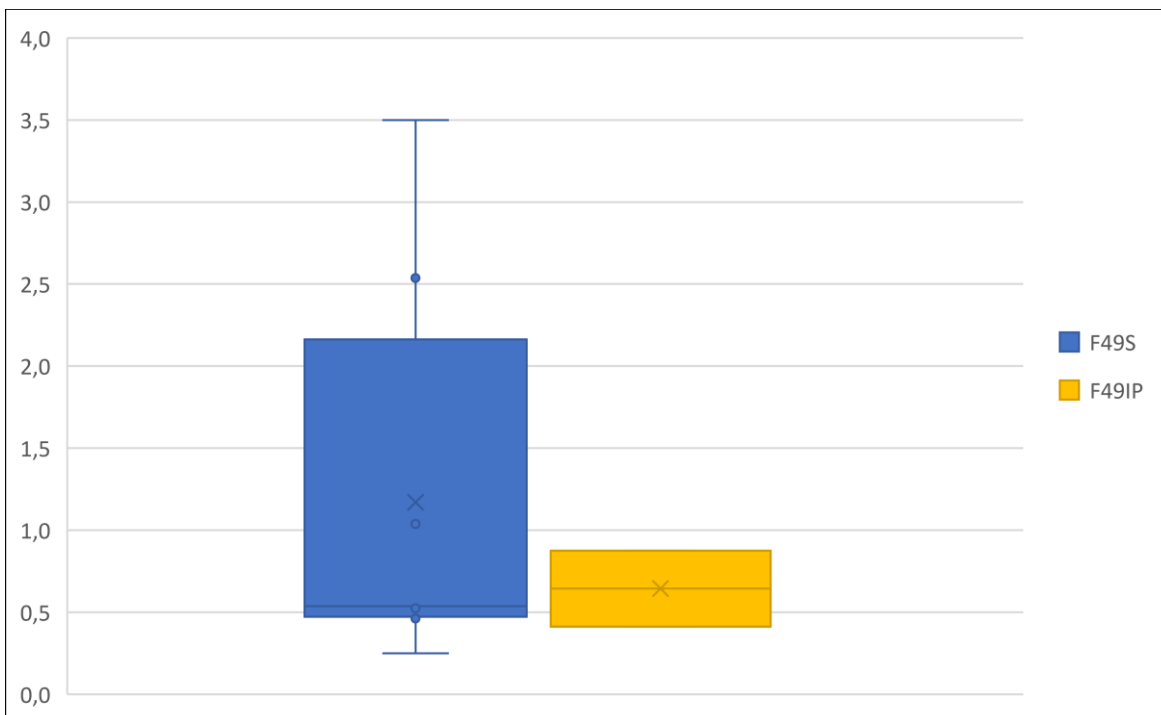


Figura 11: Boxplot caso C.T. para las distintas fases. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2 Discusión de resultados

En términos conceptuales, “perforar el precorte y no detonarlo” se equipara a line drilling o recorte de tronadura: una fila de pozos estrechamente espaciados y sin explosivo a lo largo del contorno final, cuyo fin es crear un plano de debilidad sin necesidad de la tronadura, hacia el cual rompa la tronadura principal. La evidencia académica destaca justamente que la diferencia esencial entre line drilling y otras técnicas de control perimetral es la ausencia de explosivo en los pozos perforados. (Cardu et al., 2021).

Al contrastarlo con el precorte cargado y disparado, la bibliografía técnica sostiene que en general, es más eficaz para minimizar sobre quiebre y proteger el macizo en rocas competentes, al generar de antemano una grieta continua entre pozos antes del disparo de producción. En cambio, el “recorte” o line drilling tiende a ofrecer control geométrico menos consistente (muy dependiente del espaciamiento relativo al diámetro) y mayor costo de perforación por metro; se utiliza cuando se requiere un daño mínimo del paramento o en entornos sensibles, aceptando su menor confiabilidad.

Desde el punto de vista operativo, casos industriales muestran que el line drilling puede emplearse para mejorar la productividad de perforación y el control de pared, pero su desempeño depende críticamente de la separación entre los pozos, de la calidad de alineación y, en última instancia como se conjugue con la perforación tipo Buffer (Pradatama et al., 2021), variables que, de no cumplirse, reducen sensiblemente el beneficio geotécnico. Esto coincide con reportes de campo donde se evalúa la efectividad del line drilling previo a los disparos de precorte. En síntesis, la academia y la práctica convergen en que el precorte o presplitting (cargado y disparado) sigue siendo la referencia para minimizar daño en pared final en rocas masivas y duras; en cambio, perforar sin detonar (line drilling) es una alternativa válida, pero de desempeño más variable, útil cuando se busca limitar energía cerca del contorno o donde las restricciones del sitio desaconsejan presplitting. Su adopción debe sustentarse en ensayos locales de espaciamiento/diámetro y verificación geométrica post-voladura, idealmente bajo un diseño estadístico que aisle litología y condiciones operativas.

#### *Impactos de no tronar los precortes*

El análisis de los resultados obtenidos en las distintas fases (F49S, F49Ex, F38R y F49IP) permite establecer que la decisión de no efectuar la tronadura de precorte presenta impactos diferenciados según la unidad geotécnica predominante. En el caso de las unidades PEC, PEK y PES, como están presentes en la Fase 49S, los datos sugieren que es posible mantener las líneas de diseño y la estabilidad de los taludes aun prescindiendo de la tronadura de precorte, obteniendo un promedio de 3,6m con respecto a la línea de programa, lo que es 2 m más que no efectuarla. Es importante señalar que al menos para esta fase no tronar precortes significa 0.5 m más de precisión que efectuarla. Esto representa una oportunidad favorable desde el punto de vista geotécnico y operativo. Particularmente en la Fase 49S se observa además una mayor recuperación del material programado, esto implica no salirse de los rangos permitidos ni hacer mal uso de los equipos o sobre excavación, lo que conlleva un beneficio económico adicional asociado a la optimización del recurso explotable. Un punto importante a añadir, es que los antecedentes académicos y registros bibliográficos indican que se podría aumentar la exactitud con respecto a las líneas de programa si se analiza una estrategia con la perforación de tipo buffer lo que generaría una mayor cantidad de alternativas e incluso optimización a las mallas convencionales (Pradatama et al., 2021). Estas referencias además indican

que el uso de line drilling reduce entre un 10-20% el daño de pared por concepto de PPV o (Peak particle velocity), por lo que es coherente con los resultados del estudio.

Con respecto a la fase 38R, tiene muy mala roca de caja lo que genera que la programación no sea comparable con la extracción dado que se va analizando turno a turno la condición, sumado a que en esa fase confluye la Falla Americana y la Falla Oeste por lo que el sector es inestable y la recuperación se busca con la extracción de los equipos.

La Fase 49Ex, por su parte, presenta distinto tipo de roca a medida que avanza hacia el norte, en los inicios del banco, sin embargo, son las señaladas anteriormente, por lo que queda abierto el cambio de estrategia a medida que la roca se vuelva más competente.

La disponibilidad de equipos presentada en este estudio también expone aspectos a mejorar; calidad de los datos, cantidad de datos y por sobre todo se debe ser riguroso en cuanto a relacionar cantidad de fallas por desgaste de balde y compararlos con los centroides de extracción de cada equipo, de esa forma se podría establecer claramente si las fallas pueden ser aducidas por no tronar los precortes. Ahora bien, para el caso de las palas de cable 200 y 230, es muy notorio el aumento de las horas fuera de servicio cuando se no se tronaron precortes en el banco. Para este caso la estadística señala una relación directa no marcada  $p=0.65$ , pero que, si se lleva a la extracción real, efectivamente ambas palas ingresaron a esa cota abriendo banco, lo que implica pasar si o si por la pared, lo que podría justificarse con la cantidad de eventos de mantención.

Con respecto a la granulometría, los efectos en el material, la granulometría no se ve afectada en lo absoluto por las practicas del pre corte, como antes mencionado, depende más de la tronadura de los pozos de buffer antes que el precorte.

En último término, los efectos del precorte en la tronadura, más allá de lo señalado hasta el momento, puede tener un efecto interesante en cuanto a costo y tiempo. No tronar los precortes implica estar con las tronaduras listas al menos un día antes del programa, o dar la flexibilidad para efectuar cambios cuando se requieran. Por otro lado, en el aspecto económico, también es relevante ya que si se cumplen las condiciones acá planteadas resulta en un beneficio que ayuda directamente a la sostenibilidad del negocio en el rajo Chuquicamata, por ejemplo, una tronadura de 100m de largo y 100 de ancho (cuadrada), con malla 10x5, se podría indicar cerca de 200 pozos totales, 140 producción, 40 buffer y 20 de precorte, esto es, cerca del 7% del costo total provendría del precorte.

En síntesis, los resultados indican que no tronar los precortes puede ser una estrategia viable en UGTB PEC, PEK y PES.

## 4 Conclusiones

En primer lugar, desde el punto de vista geotécnico, se constató que en las UGTB de tipo PEC, PEK y PES la omisión de la tronadura de precorte no compromete el cumplimiento de las líneas de diseño ni la estabilidad del talud. En estas unidades se alcanzó un ajuste promedio cercano al 97 % respecto de la línea de programa planificado, lo que indica que, bajo las condiciones analizadas, la estabilidad global del talud se mantiene dentro de rangos operacionales aceptables. En la fase F49Ex, la aplicación de la metodología sin precorte no generó resultados adversos, aunque la respuesta del macizo rocoso evidenció una mayor sensibilidad, lo que sugiere la necesidad de ajustes y calibraciones específicas. En contraste, la fase F38R, con UGTB predominantemente QIZ y ZCM, mostró un comportamiento geotécnico más complejo, que impide generalizar los resultados obtenidos en litologías más competentes y exige evaluaciones particulares y de mayor detalle.

En segundo término, al analizar la relación entre la no detonación de precortes y el daño en equipos de carguío, la evidencia estadística global no permitió establecer una asociación numérica concluyente. Sin embargo, en la fase F49S y para las palas 200 y 230 se observó una correlación moderada ( $r \approx 0,65$ ) entre periodos de mayor tiempo fuera de servicio por conceptos de imprevistos con baldes y elementos de desgaste y una mayor frecuencia de tronaduras sin precorte en condición de apertura de banco, lo que obligó a un repase más intenso de las paredes del talud. Este resultado mantiene abierta la hipótesis de un posible vínculo entre la metodología sin detonación del precorte, las condiciones de operación y el desgaste de los equipos, pero no permite aún definir la magnitud con el nivel de confianza requerido para decisiones definitivas.

Durante el periodo de estudio (Ene-Abr 2025), el costo mina fue de 2,6 USD/ton, donde la tronadura representó alrededor del 8 % de dicho costo. Bajo las hipótesis de trabajo y en el mejor escenario analizado, la omisión de la detonación de los pozos de precorte, sin recurrir a mayor perforación, podría reducir el costo mina en torno a un 8 % aproximadamente, lo que significa un ahorro de 1,7¢USD/ton. Considerando que el promedio de tonelaje tronado por mes es de 4.351 kton y, el 60% de las tronaduras realizadas durante el periodo de estudio contemplaron pre corte, se traduce en un ahorro potencial de 43.449 USD/mes. Lo que constituye un avance significativo en eficiencia económica. Adicionalmente, en términos operacionales, se verificó la obtención de al menos un día extra de carguío, generando mayor holgura y flexibilidad en la programación, dado que en el esquema convencional los precortes deben ser cargados el mismo día de la tronadura.

Por otro lado, el estudio evidenció que la metodología evaluada puede implementarse utilizando los mismos equipos de perforación y las mallas de diseño actualmente en uso, sin requerir diámetros menores ni espaciamientos reducidos, como propone la literatura para la técnica de Line Drilling o recorte. A los espaciamientos vigentes se logra un efecto equivalente de recorte, evitando un incremento en el consumo de acero y en el tiempo de perforación. Este resultado tiene implicancias directas en la simplicidad de implementación, al no demandar cambios estructurales en el parque de equipos ni en la ingeniería de diseño de mallas.

Finalmente, se identificaron limitaciones relevantes del estudio: heterogeneidad operativa entre bancos y fases, tamaño muestral acotado en ciertos estratos litológicos y el carácter cuasi-experimental de los datos, dado que estos no provienen de ensayos controlados. Estas restricciones no invalidan los hallazgos, pero sí acotan su ámbito de validez y obligan a interpretar las conclusiones

como evidencias sólidas para contextos análogos, más que como reglas universalmente extrapolables. En este sentido, la contribución principal de la tesis radica en demostrar, con base empírica y en un caso real de gran minería del cobre, que la omisión de precortes puede constituir una decisión técnicamente consistente y económicamente atractiva en determinados contextos geotécnicos y operacionales.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que el tratamiento de precortes —incluida su eventual omisión— puede ser gestionado como una variable de decisión estratégica, sustentada en datos y criterios geotécnicos, productivos y económicos. El enfoque propuesto amplía el repertorio de decisiones en materia de perforación y tronadura y aporta elementos concretos para una gestión más eficiente y selectiva de esta etapa crítica del proceso minero, contribuyendo a la generación de valor y a la sostenibilidad del negocio en Chuquicamata.

#### 4.1 Trabajos futuros

A partir de las conclusiones anteriores, se proponen las siguientes líneas de acción, que, si bien no forman parte de los resultados verificados, se sustentan en la evidencia obtenida y apuntan a consolidar y profundizar la aplicación de la metodología:

1. Implementar pilotos controlados por litología, con protocolos de QA/QC en perforación y medición sistemática de geometrías post-voladura, que permitan validar la omisión de precortes bajo condiciones experimentales más controladas.
2. Desarrollar modelos estadísticos avanzados (conteo–duración, supervivencia) para analizar conjuntamente frecuencia de fallas y tiempos de reparación de equipos de carguío, a fin de evaluar con mayor precisión el eventual impacto de la metodología sin precorte en el desgaste y daño de componentes críticos.
3. Establecer criterios de decisión por UGTB basados en umbrales estadísticos de brecha, sub/sobre quiebre y fragmentación, complementados con análisis costo–beneficio, de modo de definir en qué contextos resulta recomendable omitir precortes y en cuáles se debe mantener el esquema tradicional.
4. Profundizar el estudio del daño en equipos asociado al cuidado de pared y al repase de taludes, incorporando seguimiento a centroides de extracción y variables operacionales, con el objetivo de confirmar o descartar de manera robusta posibles efectos negativos de la metodología.
5. Evaluar alternativas de mallas de perforación y ajustes de factores de carga en pozos buffer orientadas a optimizar aún más el balance entre estabilidad, fragmentación y costos de tronadura.
6. Formalizar los criterios y aprendizajes derivados de esta tesis en un procedimiento interno que normalice las condiciones bajo las cuales es aceptable no detonar precortes, así como las salvaguardas de control geotécnico y operacional asociadas.

Estas recomendaciones abren una agenda de trabajo aplicada que permitiría transformar los hallazgos de esta investigación en prácticas estandarizadas, robusteciendo la toma de decisiones en perforación y tronadura y consolidando una cultura de gestión basada en evidencia en la operación de Chuquicamata.

## 5 Referencias

- Minería Chilena* (30 de Septiembre de 2014). *Así ha sido la evolución del rajo abierto más grande del mundo*. <https://www.mch.cl/negocios-industria/asi-ha-sido-la-evolucion-del-rajo-abierto-mas-grande-del-mundo/>
- Minería Chilena* (23 de Agosto de 2019). *Chuquicamata: Iniciarán la salida progresiva de equipos mina de cara al cierre programado para 2020*. <https://www.mch.cl/negocios-industria/iniciaran-la-salida-progresiva-de-los-equipos-mina-de-cara-al-cierre-programado-para-2020/>
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid.
- De Linan, C. A. C. (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. IGME.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. IGME.
- Hidalgo, T., López, I., Pincheira, J., & Troncoso, A. (2004). *Minería a cielo abierto. Métodos de Voladura*, Santiago: Universidad de Chile.
- Himanshu, V. K., Bhagat, N. K., Vishwakarma, A. K., & Mishra, A. K. (2024). *Principles and practices of rock blasting*. CRC Press.
- Cardu, M., Saltarin, S., Todaro, C., & Deangeli, C. (2021). *Precision Rock Excavation: Beyond Controlled Blasting and Line Drilling*. *Mining*, 1(2), 192-210. <https://doi.org/10.3390/mining1020013>
- Luo, X., Chen, L., Wu, B. et al. *Air leakage characteristics and comprehensive prevention of goaf side retained roadway of fully mechanized mining faces in Qincheng coal mine*. *Sci Rep* 15, 26342 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11849-3>.
- Polanco Hidalgo, E. S. (2016). *Mejoras de la gestión de perforación Mina Chuquicamata*. Universidad de Chile.
- Rebolledo Espinoza, F. (2018). *Desarrollo de metodología de diseño y planificación de tronadura controlada para administrar y controlar riesgos geotécnicos*. Universidad de Chile.
- Rodríguez Gómez, D., & Valldeoriola Roquet, J. (2014). *Metodología de la investigación*. Universitat Oberta de Catalunya. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10609/77608>
- Binda, N. U., & Balbastre-Benavent, F. (2013). *Investigación cuantitativa e investigación cualitativa: buscando las ventajas de las diferentes metodologías de investigación*. *Revista de Ciencias económicas*, 31(2), 179-187.
- Catari, P.; Barriga, C.; Villanueva, C.; Gomez, J.; Alvarado, H.; Melgar, D. & Chirinos, E., (2025). *Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos*. *Revista Novasinergia*. 8(1). 33-51. <https://doi.org/10.37135/ns.01.15.09>
- Montalvan, L. (2022). *Análisis de onda elemental para el control de vibraciones y selección de retardos en cerro Candela de mina Gold Fields*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Piura.
- Gill, J.; Johnson, P. & Murray, C., (2010). *Research methods for managers*. SAGE publications.
- Cárdenas, J. (2018). *Investigación cuantitativa (material docente N°8)*. *Trandes-programa de Posgrado en Desarrollo Sostenible y desigualdades Sociales en la Región Andina*.

Suck, A. T., & Rivas-Torres, R. (1995). *Manual de investigación documental: elaboración de tesis*. Universidad Iberoamericana.

Sarduy Domínguez, Y. (2007). *El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa*. *Revista Cubana de Salud Pública*, 33(3). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-34662007000300020&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662007000300020&lng=es&tlng=es).

Codelco (2025). *Privacidad*. <https://www.codelco.com/privacidad-0>


Liu, K., Li, Q., Wu, C., Li, X., & Li, J. (2020). Optimization of spherical cartridge blasting mode in one-step raise excavation using pre-split blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 126, 104182.

Pomasoncco-Najarro, A., Trujillo-Valerio, C., Arauzo-Gallardo, L., Raymundo, C., Quispe, G., & Dominguez, F. (2022). Pre-split blasting design to reduce costs and improve safety in underground mining. *Energy Reports*, 8, 1208–1225.

Ugolnikov, N. V., Domozhirev, D. V., Karaulov, N. G., & Prochorov, A. A. (2020). Improving the production technology of drilling and blasting operations by blasting of high ledges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 966, article 012022.


Pradatama, D., Pradasara, C., & Isnaya, M. S. (2021). The application of “line drilling” and “buffer holes” methods to reduce blasting vibration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1), Article 012057

## 6 Anexo 1: Revisión de plagio

 **turnitin** Página 1 de 45 - Portada Identificador de la entrega: trn:oid::3117:542327929

---

### 08 PG2 Matias Guerrero MIIS 2025.docx

 Universidad del Desarrollo

---

#### Detalles del documento

Identificador de la entrega trn:oid::3117:542327929	<b>39 páginas</b> <b>12.103 palabras</b> <b>66.621 caracteres</b>
Fecha de entrega 19 dic 2025, 8:27 p.m. GMT-3	
Fecha de descarga 19 dic 2025, 9:00 p.m. GMT-3	
Nombre del archivo 08+PG2+Matias+Guerrero+MIIS+2025.docx	
Tamaño del archivo 662.2 KB	




## 9% Similitud general

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

### Filtrado desde el Informe

▸ Bibliografía

### Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de Integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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



