



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Diseño de un plan operativo para la utilización de material explosivo
aluminizado para el proceso de voladura en la empresa minera
Antapaccay, Cusco, 2025**

Tesis presentada por:

Chura Estraver, Nadia Valeria

ORCID: 0009-0004-4852-5655

para optar el Título Profesional de Ingeniera de Minas

Asesor (a):

Mg. Morales Valdivia, Javier Antonio

ORCID: 0000-0003-1084-3477

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Agosto del 2026

Dictamen: 014892-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 014892, presentado por:

2018800642 - CHURA ESTRAVER NADIA VALERIA

Titulado:

**DISEÑO DE UN PLAN OPERATIVO PARA LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL EXPLOSIVO
ALUMINIZADO PARA EL PROCESO DE VOLADURA EN LA EMPRESA MINERA ANTAPACCAY,
CUSCO, 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR**



DISEÑO DE UN PLAN OPERATIVO PARA LA UTILIZACIÓN DE MATERIAL EXPLOSIVO ALUMINIZADO PARA EL PROCESO DE VOLADURA EN LA EMPRESA MINERA ANTAPACCAY, CUSCO, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unsa.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.continental.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	ENVIRONMENTAL HYGIENE & SAFETY SRLTDA. "DIA del Proyecto de Inversión Denominado Planta de Fabricación de Emulsiones - Végueta-IGA0012619", R.D. N° 252-2018-PRODUCE/DVMYPE-I/DGAAMI , 2021	<1%
	Publicación	
7	repositorio.unica.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	
9	bioamerica.cl	<1%
	Fuente de Internet	
10	alicia.concytec.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	dokumen.pub	<1%
	Fuente de Internet	
12	www.petrobrasdistribucion.cl	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to Universidad Católica San Pablo	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	www.researchgate.net	
	Fuente de Internet	

Dedicatoria

*Dedico en primer lugar, a Dios, por darme la
fortaleza y salud para culminar este camino.*

*A mi familia, por su amor incondicional, su fe
inquebrantable en mí y por ser mi pilar
fundamental ante las adversidades.*

*A mis amigos y colegas por las palabras de
aliento y sus sabios consejos.*

*A todos ustedes dedico este hito, que es solo el
comienzo de un camino para seguir celebrando
muchos más.*



Agradecimientos

*A mi casa de estudios, la UCSM, por ser
el escenario de mi crecimiento
profesional y personal.*

*A mis mentores y plana académica, por
su disposición y rigor académico para
culminar con éxito cada etapa.*

*A la empresa Enaex, por brindarme las
facilidades y la confianza depositada en
mí para hacer realidad la investigación.*



RESUMEN

La investigación examinó como al implementar el Kallpex en la mezcla explosiva en el proceso de voladura de la empresa minera Antapaccay, 2025, y de esta forma obtener un explosivo mejorado que provoque una reacción rápida y controlable, útil para rocas duras y con un coste elevado de perforación. En este sentido, la tesis se enfocó en la creación de un diseño operativo para la utilización del aditivo aluminizado en explosivos conocido como Kallpex, dado que los explosivos de tipo pulverulento constituidos por una mezcla de nitrato de amonio y un combustible no suelen tener la suficiente fuerza energética para fragmentar la roca, por lo que se recomendó la utilización de aditivos como el Kallpex. Para abordar esta situación se usó el método cuantitativo, dado que en todo el proceso se observó cómo funciona el aditivo Kallpex en la combinación con el aluminio, la técnica empleada es la ficha de cotejo. Por lo tanto, se comprueba que la mezcla explosiva con aditivo aluminizado para fines mineros, son elementos correctos, esto se llevó a cabo al trazar un plan de acción desde la obtención, manipulación y utilización de explosivos combinados con un porcentaje de producto Kallpex.

Palabras clave: voladura, aluminio, y fragmentación.

ABSTRACT

The research examined how implementing Kallpex in the explosive mixture in the blasting process at the Antapaccay mining company, 2025, would result in an improved explosive that causes a rapid and controllable reaction, useful for giant rocks with high drilling costs. In this regard, the thesis focused on creating an operational design for the use of the aluminized additive in explosives known as Kallpex, given that powdered explosives consisting of a mixture of ammonium nitrate and a liquid fuel do not usually have sufficient energy to pulverize the rock, which is why the use of additives such as Kallpex is recommended. To address this situation, the qualitative method was used, given that throughout the process it was observed how the Kallpex additive works in combination with aluminum. The technique used is the comparison sheet. Therefore, it has been verified that explosive mixtures with aluminized additives for mining purposes are correct elements. This was carried out by drawing up an action plan covering the procurement, handling, and use of explosives combined with a percentage of Kallpex product.

Keywords: blasting, aluminum, and fragmentation

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 5

1.2.1. OBJETIVO GENERAL 5

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6

1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN 6

1.3.1. PREGUNTA GENERAL 6

1.3.2. PREGUNTAS ESPECÍFICAS 6

1.4. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 6

1.5. PALABRAS CLAVE 6

1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 6

1.6.1. JUSTIFICACIÓN CONCEPTUAL 6

1.6.2. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA 7

1.6.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA 7

CAPÍTULO II 8

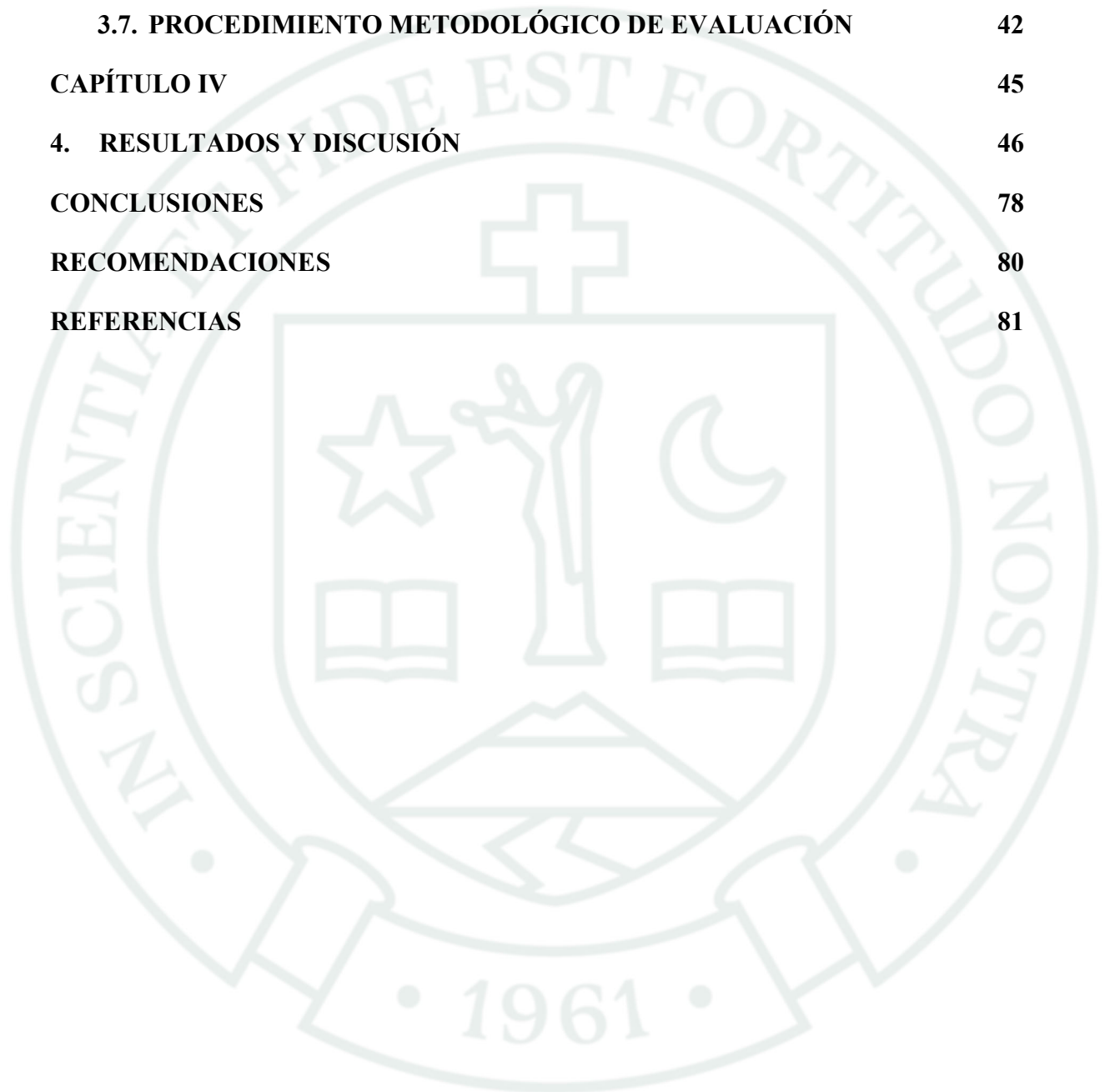
2. MARCO TEÓRICO 9

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO 9

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MINA DE ANTAPACCAY 9

2.2.1.UBICACIÓN	9
2.2.2.TIPO DE EXPLOTACIÓN	10
2.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	11
2.4. BASES TEÓRICAS	15
2.5. USO DE EXPLOSIVOS	18
2.6. MINA ANTAPACCAY	32
2.7. HIPÓTESIS	36
2.8. VARIABLES	36
2.8.1. VARIABLE DEPENDIENTE	36
2.8.2. VARIABLE INDEPENDIENTE	36
CAPÍTULO III	37
3. MARCO METODOLÓGICO	38
3.1. UBICACIÓN Y CLIMA	38
3.1.1. UBICACIÓN	38
3.1.2. CLIMA	38
3.2. ALCANCES Y LIMITACIONES	38
3.2.1. ALCANCES	38
3.2.2. LIMITACIONES	39
3.3. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	39
3.3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	39
3.3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	40
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	40
3.4.1. POBLACIÓN	40
3.4.2. MUESTRA	40
3.5. MÉTODO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	41

3.5.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	41
3.5.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	41
3.5.3. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	41
3.6. PLAN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS	42
3.7. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE EVALUACIÓN	42
CAPÍTULO IV	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS	81



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 INTERACCIÓN DEL ALUMINIO CON LOS PARÁMETROS DE VOLADURA	24
TABLA 2 INDICADORES TÉCNICOS SOBRE LOS TIPOS MEZCLAS EXPLOSIVAS ANFO	25
TABLA 3 PROPIEDAD DEL KALLPEX	27
TABLA 4 CUADRO DE PRECAUCIONES KALLPEX	52
TABLA 5 IMPACTO CUANTITATIVO DE LAS DESVIACIONES OPERATIVAS DEL KALLPEX	66
TABLA 6 CONCEPTOS RELATIVOS A LA VOLADURA	69
TABLA 7 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS Y PRUEBA T PARA INDICADORES DE VOLADURA	72

ÍNDICES DE FIGURAS

FIGURA 1 REGISTRO PRELIMINAR DE DETONACIÓN	46
FIGURA 2 PROMEDIO DE FRAGMENTACIÓN	47
FIGURA 3 PROMEDIO DE VIBRACIÓN	48
FIGURA 4 PROMEDIO FP	49
FIGURA 5 CANTIDAD PROMEDIO DE ROCA DETONADA	49
FIGURA 6 FDS KALLPEX	50
FIGURA 7 IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS	51
FIGURA 8 COMPONENTES DEL KALLPEX	53
FIGURA 9 DATOS SOBRE ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD	54
FIGURA 10 TRASLADO DE KALLPEX	54
FIGURA 11 TRASEGADO DE KALLPEX	55
FIGURA 12 TIPOS DE ROCAS	61
FIGURA 13 MALLAS DE PERFORACIÓN SEGÚN MACIZO ROCOSO	61
FIGURA 14 TIEMPO PROMEDIO ENTRE TALADROS	62
FIGURA 15 TIEMPO PROMEDIO ENTRE FILAS	62
FIGURA 16 PROMEDIO DE P80	63
FIGURA 17 CONCLUSIONES DEL INFORME ENAEX	65
FIGURA 18 VISCOSIDAD	65

INTRODUCCIÓN

En el territorio nacional la extracción de minerales es una de las actividades económicas más importantes para el tesoro público y también para los agentes privados que se dedican a este sector. La zona sur del país no está exenta de esta situación, ya que hay numerosos proyectos mineros en proceso de implementación y muchos otros ya están funcionando. Cusco es uno de los departamentos donde esta actividad económica tiene más impacto, dado que la producción minera cuprífera es una de las principales vías de ingresos para el tesoro público local.

En este sentido el objetivo general del presente estudio es Implementar el Kallpex en la mezcla explosiva en el proceso de voladura de la empresa minera Antapaccay, 2025; desde este punto se desglosan tres objetivos específicos, el primero versa sobre revisar los beneficios de utilizar explosivos con aditivos para la voladura en la actividad minera de la empresa minera Antapaccay, el segundo es diseñar un proceso para utilizar Kallpex desde su obtención, almacenamiento y utilización responsable, y por último es realizar una evaluación de los resultados de la voladura realizada con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex en la empresa minera Antapaccay.

Del mismo modo, la justificación para el trabajo es en la mina de Antapaccay existen mineral con alta índice donde el material rocoso es difícil de fragmentar, por lo tanto resulta interesante e innovador mezclar sustancias explosivas que posibiliten un control más efectivo en el manejo de la voladura, así como en encontrar materiales aditivos que sean más eficaces para fragmentar el mineral contenido en el macizo rocoso. Uno de estos es el Kallpex, un aditivo tipo hidrogel aluminizado originario de Colombia, diseñado para reducir la segregación de los componentes minerales. En concreto, en la compañía minera Antapaccay se trabaja con mezclas explosivas con una eficacia reducida para fragmentar la roca.

Para comprobar la hipótesis sobre si el uso del aditivo Kallpex es una mezcla ideal de explosivo aluminizado incrementara notablemente la potencia energética y la rapidez de reacción del explosivo, lo que también permite que la fragmentación sea más eficaz, en donde se reducirán costos operativos en las etapas posteriores, esto se verifica mediante el plan de comprobación en donde la recopilación de observaciones y análisis de datos en la operación minera al usar el Kallpex para la fragmentación controlada del macizo rocoso reduce el costo total del procesamiento mineral y además destruye adecuadamente el material rocoso.

Para concluir, la investigación se desglosa en varios capítulos; el primero se enfoca las preguntas del problema general y específicos, así como la justificación de la tesis; el segundo capítulo aporta investigaciones pasadas como material de información y verificación de la veracidad del estudio, así como conceptos generales del tema de investigación y las variables ; el tercer capítulo se desarrolla el marco metodológico para entender el proceso de investigación y conocer los instrumentos que se usaron para llegar a una conclusión y comprobar si la hipótesis es correcta; en el último capítulo finalmente se ven los resultados de la investigación para confrontarlos con el aporte de otros estudios siendo favorable o no favorable el análisis y de esto se sacan cuatro conclusiones y recomendación que serán vitales para entender el desarrollo del tema.





1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

En el contexto peruano, la explotación minera es una de las actividades económicas de mayor relevancia para el erario público tanto como para los agentes particulares dedicados a este rubro. La región sur del país no es ajena a esta realidad, numerosos proyectos mineros están en vías de implementación y muchos otros ya se encuentran en funcionamiento. Unos de los departamentos donde esta actividad económica tiene mayor influencia es la de Cusco. La producción minera cuprífera es una de las principales fuentes de ingresos para erario público local, del mismo modo, la relación entre minería y estado se realiza por medio de convenios con empresas privadas la cuales cumplen con estándares de calidad y sostenibilidad. Ahora bien, conforme a estudios económicos, para el cierre del año 2023, la minería en la región del Cusco aumentó porcentualmente en un 13%, esto equivale a un mayor manejo de recursos productos del canon minero.

No cabe duda que una de las empresas más relevantes dentro de este rumbo es la compañía Antapaccay (parte del conglomerado empresarial internacional Glencore). La minera Antapaccay suma una proyección de labores por más de una década en la provincia de Espinar. Podría referirse que uno de sus mayores puntos a favor de esta empresa ha sido la adopción de políticas de promoción del empleo y adquisición de servicios de empresa de miembros de la comunidad de la región Cusco. Su siguiente gran paso será el proyecto Coroccohuayco planeado para extender esta actividad por alrededor de 28 años más (Alza, 10 de junio de 2025).

En este sentido, se debe tomar en cuenta que para el inicio de las operaciones es necesario el trabajo de voladura, el diseño de este paso inicial, en buena cuenta, define la productividad del yacimiento. Por lo tanto, la optimización del diseño de voladura es una cuestión de sustancial importancia. Actualmente, la utilización deviene de la mezcla de sustancias explosivas que permitan un mayor control en el manejo de la voladura, además de la búsqueda de materiales aditivos más eficientes desde la perspectiva de la fragmentación del mineral contenido en roca sólida.

Uno de estos es el Kallpex, aditivo tipo hidrogel aluminizado de origen colombiano creado para la disminución de la segregación de componentes minerales. Específicamente, en la empresa minera Antapaccay el trabajo se realiza con mezclas explosivas con una eficiencia para la fragmentación de roca disminuido. En la mina Antapaccay, el uso de explosivos convencionales (como Vertex) ha mostrado limitaciones para alcanzar una fragmentación

óptima (menor a 1 pulgada) en roca diorita de alta dureza, lo que incrementa costos en etapas posteriores de chancado y molienda. Adicionalmente, no se cuenta con un plan operativo estandarizado que permita incorporar aditivos aluminizados como el Kallpex, considerando sus particularidades reológicas (alta viscosidad, sedimentación) y riesgos asociados.

Ahora bien, cabe destacar que su utilización tiene determinadas reglas para su correcta manipulación, el primero de estas indicaciones se refiere a los depósitos de transporte debido a la alta sensibilidad del reactivo, por ende, esta debe ser supervisada desde su adquisición hasta su utilización final. De otro lado, su manipulación por parte de los trabajadores debe realizarse en el estricto conocimiento y capacitación respecto de sus riesgos.

Con todo lo versado, la importancia de utilizar unidades de explosivos adecuados y eficientes en la actividad minera es una necesidad para las empresas dedicadas a este rubro, siempre y cuando estas se encuentren acompañadas por un sistema de previsión de riesgos relativos a accidentes en su almacenamiento, transporte, utilización o eliminación de residuos. La investigación implicará un estudio previo a la implementación de una mezcla adecuada Kallpex para la fragmentación de mineral a efecto de contribuir con la eficiencia explosiva y el ahorro económico.

El plano operativo para llevar a cabo la presente investigación tuvo como lugar la zona conocida como Banco X (o sector Y) de la mina Antapaccay, la cual tiene un asentamiento rocoso mayormente compuesto por diorita, con una resistencia de comprensión >100 MPa. Los parámetros permitidos para las voladuras en este sector, dadas las condiciones tanto del terreno como ambientales fueron una malla de perforación (5.2x5.0m), burden, espaciamiento, tiempo entre filas y taladros. Respecto de la mezcla explosiva será compuesta por emulsión base (ANFO) con el aditivo aluminizado Kallpex.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Determinar el impacto de la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva sobre los resultados de fragmentación y desempeño de la voladura en la empresa minera Antapaccay, 2025.

1.2.2. Objetivos específicos

Analizar los beneficios del uso de explosivos con aditivos aluminizados en el proceso de voladura de la empresa minera Antapaccay.

Diseñar un proceso técnico para la obtención, almacenamiento y utilización responsable del aditivo Kallpex en mezclas explosivas.

Evaluar los resultados de fragmentación, factor de potencia y vibración obtenidos mediante voladuras realizadas con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex.

1.3. Preguntas de investigación

1.3.1. Pregunta general

¿Cuál es el impacto de la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva sobre los resultados de fragmentación y desempeño de la voladura en la empresa minera Antapaccay, 2025?

1.3.2. Preguntas específicas

¿Qué beneficios genera el uso de explosivos con aditivos aluminizados en el proceso de voladura de la empresa minera Antapaccay?

¿Cómo debe diseñarse un proceso técnico para la obtención, almacenamiento y utilización responsable del aditivo Kallpex?

¿Qué resultado de fragmentación, factor de potencia y vibración se obtienen mediante voladuras realizadas con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex?

1.4. Línea de investigación

Optimización de procesos mineros

1.5. Palabras clave

Kallpex, Aditivo aluminizado, ANFO, Voladura, Fragmentación, Antapaccay y Minería

1.6. Justificación e importancia

1.6.1. Justificación conceptual

Al analizar el presente proyecto para implementar un plan de acción para implementar el aditivo aluminizado como el Kallpex a la mezcla explosiva para la voladura de material rocoso en minas, es capacitar al personal sobre el uso de este material, dado que ello reduce costos y tiempo aportando mayor rendimiento laboral.

1.6.2. Justificación práctica

La razón fundamental de la tesis es que al implementar el plan de acción sobre la mezcla del Kallpex, dado que al procesar esta combinación se obtiene una mejor fragmentación de la roca en las minas de tajo abierto y esto ayuda a mejorar el trabajo en la minería de Antapaccay, así también sería un motivo de descubrimiento en donde otras minas también podrían hacer el uso de esta combinación.

1.6.3. Justificación económica

Para la investigación fue sustancial encontrar un proveedor de explosivos autorizado que nos proporcione la seguridad respecto del estado del material previo a su adquisición, dado que estos productos explosivos requieren que el comprador, en este caso, la empresa minera donde se realizó las pruebas piloto si contaban con autorización para la manipulación de explosivos, y al mismo tiempo, se contó con personal con la debida autorización de SUCAMEC.



CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Contexto Geológico

2.2. Características de la mina de Antapaccay

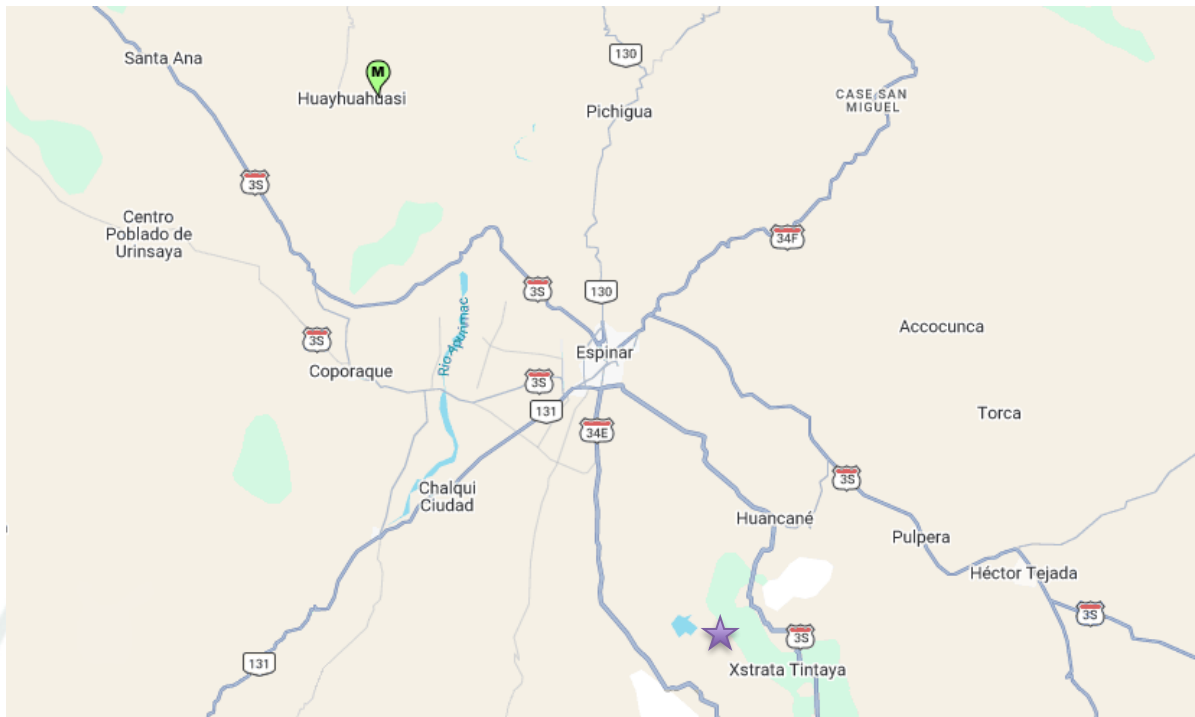
2.2.1. Ubicación

La Compañía Minera Antapaccay constituye una de las principales operaciones de minería a tajo abierto del sur del Perú, la cual se dedica a la explotación de cobre usando la perforación y voladura. La operación minera está localizada en la región Cusco, provincia de Espinar, al interior de la cordillera de los Andes del sur peruano. La zona se caracteriza por presentar altitudes superiores a los 4,000 m s.n.m., influyendo directamente en las condiciones atmosféricas y, por ende, en el comportamiento de los explosivos.

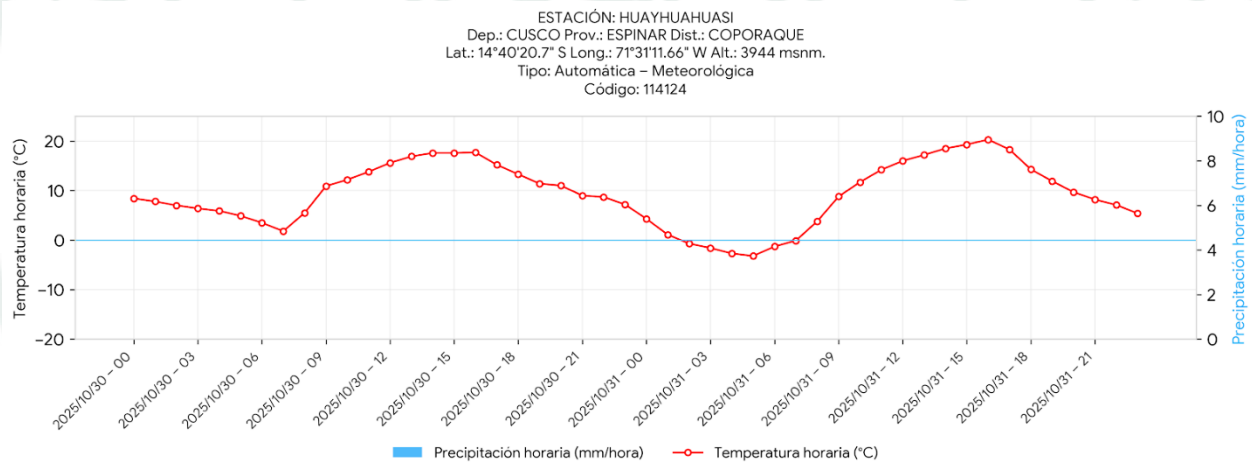
Las coordenadas geográficas aproximadas del proyecto son 71° 18' longitud Oeste y 14° 27' latitud Sur. La operación minera se emplaza dentro de la cuenca del río Salado, afluente del río Apurímac, formando parte del sistema hidrográfico del Atlántico.

En cuanto al clima, la zona presenta un clima frío de alta montaña, teniendo una marcada diferencia de la temperatura entre el día y la noche, en las temporadas de lluvias concentradas entre los meses de noviembre y marzo, y estación seca entre abril y octubre. Dicha variación de condiciones influye directamente en las operaciones de perforación y voladura, especialmente en el comportamiento de explosivos sensibles a la humedad como el ANFO.

En estas operaciones andinas, la presencia de agua en los taladros durante temporadas de lluvia condiciona la selección de explosivos con mayor resistencia hídrica, como emulsiones o mezclas aluminizadas, frente al uso tradicional de ANFO, cuya eficiencia disminuye en ambientes húmedos.



Fuente: Extraído de la página oficial del SENAMHI, octubre 2025.



Fuente: Extraído de la página oficial del SENAMHI, octubre 2025.

2.2.2. Tipo de explotación

Para la explotación en Antapaccay se optó por el método de minería a tajo abierto, el cual consiste en la remoción progresiva del material estéril y mineral mediante el uso de bancos escalonados. Requiriendo la aplicación de voladuras periódicas para la fragmentación del macizo rocoso para permitir su carga y transporte posterior.

Al optimizar el proceso de perforación y voladura se incrementa la productividad y además se reduce los costos operativos, tal como señalan estudios aplicados en minería superficial (Gonzales Dota, 2022; Gormas y López, 2022). Al hacer uso de una fragmentación

adecuada se disminuye el consumo energético en etapas posteriores, generando un impacto directo a la eficiencia global del proceso.

2.3. Antecedentes de la Investigación

2.3.1. Antecedentes internacionales

Como primer antecedente internacional tenemos al trabajo de Gonzales Chocue y Correa (2024), tenemos el título «Diseño de un sistema de costos basado en un modelo industrial para empresas del sector minero del departamento del Cauca», tuvo por objetivo el diseño de costos para empresas para la eficiencia de los gastos en sus diferentes procesos, dentro de ellos el proceso de voladura. Las conclusiones arribadas por los investigadores indican que tipos de explosivos tipo hidrogel aluminizados sirven para evitar la segregación de elementos oxidantes, resistentes al agua y alta energía específica; del mismo modo, es útil para su manejabilidad por su bajo índice de sensibilidad al roce e impacto.

Además, el uso de los explosivos hidrogel aluminizados presentan una mayor densidad que el ANFO convencional, lo cual incrementaría la presión al momento de detonar y se mejoraría el confinamiento energético. Dicha característica además resulta relevante en macizos rocosos de alta resistencia a la compresión, donde la eficacia va a depender de manera directa con la energía que se transmite al frente de la onda de choque.

De su lado, Díaz (2023), en su trabajo denominado «La química de los explosivos primarios más representativos y el 1, 3, 5-trinitro 2, 4, 6, trinitroaminobenceno», el cual tuvo como objetivo principal realizar una revisión bibliográfica acerca de la química de los explosivos utilizados en actividades mineras. Con un enfoque de tipo cuantitativo, utilizando la revisión documental realizó una descripción química de los explosivos que componen el instrumento para la voladura en una empresa minera de México. Para la examinación de la detonación se utilizaron algunos explosivos aluminizados que demostraron que el utilizar explosivos sin aditivos son altamente inestables, por lo que se requiere un compuesto de coordinación (aditivo), el cual otorga estabilidad y la posibilidad de manipularlos sin correr riesgos de accidentes fortuitos.

Del mismo estudio se menciona que la estabilidad química en explosivos industriales se relaciona con la sensibilidad al impacto, fricción y temperatura del ambiente. El ANFO tiene entre sus componentes nitrato de amonio, el cual es termodinámicamente estable bajo condiciones normales, pero se puede volver sensible si el uso de combustible no se encuentra balanceado con el nitrato. Al incorporar el aluminio no solo se va aumentar la energía total

liberada, sino que se va a modificar la fase de postdetonación, teniendo como resultado una duración extendida de la presión de los gases calientes, favoreciendo el desplazamiento del material fragmentado.

Desde Ecuador, el trabajo de Gonzales Dota (2022), denominado «Optimización de los procesos de perforación y voladura en la Sociedad Minera Nueva Rojas, concesión Bella Rica, Camilo Ponce Enríquez - Azuay» con el objetivo de desarrollar una metodología capaz de optimizar el proceso de voladura de una empresa minera. Este trabajo de enfoque cuantitativo realizó una investigación experimental basados en la recopilación de datos sobre la forma en como optimizar el proceso de voladura.

Como parte de sus conclusiones, se obtuvieron evidencias que utilizar ANFO aluminizado tenía un mejor tiempo de respuesta prudencial de la reacción explosiva, lo cual permitía apartarse razonablemente a los operadores, además se señaló como característica especial de este tipo de mezcla explosiva a su baja resistencia al agua, sin embargo, el incremento en su utilización se puede deber a su gran velocidad de reacción, la gran cantidad de productos gasificados, sencilla manipulación, coste bajo y la seguridad en su manejo y utilización.

Complementariamente, Kolev y Tsonev (2022) teniendo como objeto principal el estudio de un explosivo de mayor rendimiento energético y con mejor estabilidad físico-químico. Incorporando así el aluminio metálico en partículas finamente dispersas dentro de una matriz polimérica, donde se evaluó; la velocidad de detonación (VOD), la presión de detonación, energía específica liberada, la estabilidad térmica y la sensibilidad al impacto y fricción.

Demostrando que al usar explosivos aluminizados con aglutinantes especializados se puede incrementar la energía de explosión sin comprometer la estabilidad estructural, ya que el aluminio reacciona con los productos gaseosos calientes liberados durante la detonación primaria, generando así una liberación de energía adicional en una fase ligeramente posterior a la onda de choque inicial.

2.3.2. Antecedentes nacionales

Del lado nacional, tenemos el trabajo de Lazarte (2025), con su trabajo «Mejora de la ratio de excavación de las palas de carguío mediante el uso del explosivo gasificado HA73G Emulgex en voladuras de minería superficial, Región Cusco, 2023», el cual buscó el mejoramiento del radio de excavación mediante el uso de explosivos gasificados en voladuras

de minería superficial. Este trabajo de enfoque cuantitativo, utilizado un diseño experimental para comprobar su hipótesis de trabajo, la cual lo llevo a concluir que el uso de explosivos tipo HA73G Emulgex mejoró el radio de excavación, sin embargo, como medidas de seguridad, el autor advierte que es necesario respetar los 20 minutos de gasificación previo al tapado con tierra del material explosivo.

El trabajo de Gormas y López (2022), denominado «Propuesta de un plan de minado para incrementar la productividad en una cantera no metálica en Cajamarca 2022», tuvo por objetivo principal proponer un plan de minado para el incremento de la productividad en una cantera no metálica. El enfoque cuantitativo de la investigación permitió al investigador realizar un estudio geológico de la zona a minar, y posterior a ello, comprobar cuál era el tipo de explosivo a utilizar.

Específicamente, en la zona, una cantera no metálica que presente resistencia a la compresión simple en los 50Mpa y los 10Mpa, con un espacio de fracturas menor al metro se debe utilizar material explosivo tipo ANFO aluminizado a efecto de producir una explosión controlada, de fragmentación alta y de reacción lenta.

El estudio de Valdivia (2020), titulado “Evaluación técnico–económica del uso de ANFO aluminizado en operaciones de tajo abierto en el sur del Perú”. Se tuvo como objetivo analizar el impacto del ANFO aluminizado en la eficiencia de voladura y su impacto en los costos totales de la operación. Mediante un enfoque cuantitativo y experimental, se comparó voladuras con el ANFO convencional frente a ANFO reforzado en condiciones similares de macizo rocoso.

Al momento de comparar los resultados se mostró que el ANFO aluminizado incrementó la velocidad de detonación efectiva y mejoró la distribución granulométrica del material volado, reduciendo el porcentaje de fragmentos mayores al tamaño óptimo para chancado. Además, se logró evidenciar una disminución en el consumo energético del proceso de conminución posterior, generando un ahorro indirecto que compensó al mayor costo inicial del material explosivo.

Otro hallazgo particularmente importante fue que, en altitudes superiores a 3 800 m s. n. m., la densidad del explosivo y la calidad del confinamiento van a influir significativamente en el rendimiento energético. Siendo este punto clave para la operación en Antapaccay, donde la altitud supera los 4 000 m.s.n.m. y las condiciones atmosféricas afectan la combustión secundaria del aluminio.

Finalmente, el trabajo de León (2021), de título «Aplicación de la mezcla explosiva Quantex 73 para la optimización de la voladura primaria en la fase 2 del tajo Toromocho - Cia minera Chinalco Morococha Junín 2020», tuvo por objeto en qué medida el explosivo utilizado optimizar la voladura primaria en la mina señalada. Bajo una investigación de tipo cuantitativo, llevó a cabo el estudio experimental para evaluar las cualidades del material explosivo con un incremento en la velocidad de detonación con una mezcla aluminizada. Las conclusiones fueron que la mezcla señalada reducía efectivamente el tamaño del fragmento producto de la voladura.

Siguiendo estas investigaciones, el producto Kallpex se enmarca en la industria minera para el uso de fragmentación de roca, este fenómeno es crucial para las operaciones mineras y su uso masificado se dio en el Perú, de la mano siguió el país vecino de Chile se le conoce al Kallpex por la nomenclatura técnica usada para los agentes explosivos o de voladura, estos productos dominan el mercado porque es importante para la extracción minera, es de resaltar que el producto mencionado ya sienta sus bases para la correcta aplicación en el país vecino de Chile.

Como se sabe Chile es el país que principalmente fabrica nitrato de amonio y explosivos en Sudamérica, por lo que representa un espacio de origen dado a que se puede obtener resultados mediante un campo de pruebas pilotos y aplicación de este producto para el proceso de voladura de material rocoso, el uso del Kallpex se anuncia y confirma en grandes ambientes de reuniones mineras, donde la eficiencia es crucial porque ayuda a la fragmentación de la roca, esto favorece a la productividad. La empresa Enaex comercializa una amplia gama de agentes de voladura, asimismo, la minería de gran escala como Codelco utiliza diversos explosivos para la voladura de la roca, entonces no sería fuera de otro mundo el uso del Kallpex para el mejoramiento de estos procesos de explosión.

El Kallpex, como todos los agentes de voladura y explosivos, está sujeto a una rigurosa ley de control y seguridad en Chile. El uso de esto se limita estrictamente a personal que haya sido autorizado, certificado y calificado de manera sobresaliente por las entidades pertinentes, esto para evitar accidentes, entonces resulta necesario seguir protocolos rigurosos al almacenar, transportar y utilizar en las actividades mineras.

En este sentido, Enaex ha desarrollado tecnologías explosivas como Kallpex, que regula su energía de acuerdo con el macizo rocoso, y las respalda con los camiones fábrica Milodón, los cuales mejoran la precisión y el rendimiento. Asimismo, enfatiza que para incrementar la

estabilidad de taludes y el tonelaje, es esencial perfeccionar la perforación con diseños de malla eficaces. Enaex Bright es un ecosistema que combina módulos de monitoreo y ajustes en tiempo real, inteligencia artificial y el software O-Pitblast para explosiones precisas. Con su ayuda, se desarrolla la transformación digital (Cardenas, 2025).

Esas fueron las palabras de Ingeniero en una conferencia muy importante cuando se realizó el evento de Perumin, donde diferentes ingenieros de distintos países asistieron para presentar algunas innovaciones, entre ellas se destaca lo antes dicho por el Ingeniero Cardenas, entonces es reconocible que la implementación del Kallpex poco a poco está siendo probado para su uso eficiente.

2.4. Bases teóricas

2.4.1. Explotación minera

La minería en nuestro territorio es una actividad económica de origen primario que consiste en la extracción y procesamiento de minerales metálicos y no metálicos, estos se encuentran en yacimientos del suelo o subsuelo. Asimismo, contribuye en la economía del Perú porque aporta significativamente al PBI nacional siendo una de las principales fuentes de ingresos por exportaciones. Rojas y Miranda (2022) centran uno de los mayores problemas de la actividad minera, en su estudio aplicado a las operaciones de la Compañía Minera Antapaccay que las propiedades de alta tenacidad de la roca afectan negativamente a la tonelada procesada debido a la fragmentación inicial deficiente. Subrayan la importancia de emplear explosivos de mayor energía que aumenten la proporción de fragmentación fina. Bajo este enfoque técnico, el diseño de un plan operativo para introducir el aditivo aluminizado Kallpex busca responder a esta necesidad energética frente a rocas resistentes como la diorita.

Por otro lado, el autor Pachas (2014), menciona que cada recurso natural se considera un patrimonio de la nación en su origen y su utilización está regulada por el sistema de concesiones, permisos y/o licencias de acuerdo con las regulaciones particulares que son aplicables a cada caso individual, además de otorgar derechos de explotación, abarca las bases para la fiscalización de las operaciones. En este contexto, cualquier persona jurídica o natural que quiera llevar a cabo acciones de exploración y/o explotación debe recibir una concesión minera anterior. La concesión minera concede a su poseedor un derecho, real y único para llevar a cabo actividades de indagación y/o explotación minera de materiales metálicos o no metálicos en el interior del sólido de profundidad indefinida, que estará dividida en cuadrículas de 100 hectáreas como mínimo, pero sin exceder las 41000 hectáreas.

2.4.2. Definición de voladura

La voladura es una técnica de ingeniería que consiste en la liberación controlada de la energía química almacenada dentro de los explosivos, generando una fractura mecánica de energía en el macizo rocoso. Los autores Bernaola et. al (2013), definen a la voladura como la disposición de un montón de barrenos a los que se adhiere una gran cantidad de explosivo y se prende con una secuencia consiguiendo los resultados de fragmentación y desplazamiento deseados y no se afecta elementos ajenos, también es posible la voladura en campo abierto o interior. La onda de choque producida inicialmente por compresión extrema, la expansión gaseosa genera el desplazamiento volumétrico del material. Siendo estos dos fenómenos, el choque y la expansión, los verdaderos protagonistas del proceso.

En otras palabras, esta voladura consiste en colocar explosivos para detonarlos en una parte de la minería, teniendo como objetivo lograr que el material se fragmente y se desplace de la manera deseada y adecuada para la obra minera, asimismo se busca que este proceso no afecte elementos externos o ajenos al área de trabajo.

2.4.3. Objetivos de la voladura en minería a tajo abierto

El objetivo fundamental de la voladura en minería a cielo abierto es conseguir que la roca se fragmente de manera adecuada, a fin de facilitar su extracción y procesamiento. Cuando se hacen estallar explosivos en una secuencia planificada, se busca que los fragmentos resultantes sean de un tamaño óptimo para reducir el costo de la molienda y la trituración. Además, la voladura permite que el material se desplace hacia sitios donde la maquinaria puede cargarlo de forma más eficiente.

Otro propósito es proteger la seguridad del personal y de las instalaciones, previniendo las vibraciones en exceso y los proyectiles que sean peligrosos. Asimismo, se busca preservar la forma del tajo y la estabilidad de los taludes para evitar causar perjuicios a las estructuras. La finalidad de esta técnica es balancear el control ambiental y la productividad por medio de la reducción del polvo y el ruido. La voladura, en este contexto, es una operación estratégica que mezcla la precisión técnica con la planificación. Finalmente, su éxito depende de un diseño detallado que considere la variedad de explosivo, las condiciones ambientales y la geología.

De manera más técnica, con una fragmentación adecuada, se evalúa mediante parámetros granulométricos como el tamaño promedio del fragmento y el porcentaje de sobre tamaño de los fragmentos resultantes. Una fragmentación eficiente reduce el consumo energético en los procesos de chancado y moliendas posteriores, representando estos procesos

como los de mayor costo operativo en la minería a cielo abierto. Asimismo, las vibraciones son medidas y controladas a través de indicadores como la velocidad pico de partículas (PPV), permitiendo proteger las estructuras cercanas y garantizando así la estabilidad geotécnica del tajo.

2.4.4. Desarrollo del proceso de voladura

En cuanto al manejo del riesgo en la voladura implica la identificación de factores como proyección de fragmentos (flyrock), las vibraciones inducidas, emisión de gases postdetonación y posibles fallas de iniciación. Empleando protocolos de seguridad los cuales incluyen radios de evacuación monitoreo sísmico y verificación del circuito de iniciación. Para la gestión de los residuos se controla y neutraliza los gases residuales como óxidos de nitrógeno y el uso correcto de los restos de explosivos no detonados, siempre respetando la normativa ambiental y la seguridad industrial correspondiente.

2.4.5. Proceso de voladura

El proceso de voladura en la minería es una técnica utilizada para fracturar grandes masas de roca, permitiendo su posterior extracción y procesamiento. Es una de las etapas más importantes en las operaciones mineras, especialmente en la minería a cielo abierto, ya que de su eficiencia depende en su mayoría de cuanto se extrae en la cadena de producción.

Para este proceso existen al menos cinco etapas. La primera implica la perforación del espacio mediante el uso de pozos o taladros para roca, antes de realizar este primer paso, se debe realizar un estudio detallado sobre el tipo de suelo donde se realizará la extracción, en especial para indagar el tipo de suelo, la dureza, la presencia de fracturas y otros.

Pasado la primera etapa señalada, se procede con el carguío de explosivo, como su propio nombre lo indica se depositan en lugares estratégicos ya planeados conforme al primer paso, en este se llega a calcular el nivel de fragmentación de la roca y la reducción de subprocesos no deseados como el levantamiento de polvo, vibración y ruido. El paso intermedio es la creación operativa del cargamento explosivo por medio de la conexión y el amarre, a partir de este, los explosivos son conectados a una fuente de detonación, con lo cual se crea un circuito de iniciación.

Como punto central de la voladura, procede la detonación luego del despeje del área y la evaluación de los riesgos latentes, se genera una onda de choque o expansiva que puede llevar consigo rocas, arena u otros en forma de fragmentos de tamaños diminutos y otros un poco más grandes. Finalmente, luego de ocurrida la explosión corresponde la extracción del

material obtenido, este a través de su cargamento a vehículos de transporte de mineral, aquellas que presente en sus posibles restos minerales son llevados a otro espacio para su trituración y molienda.

La detonación implica una reacción exotérmica supersónica generadora de presiones extremadamente altas en microsegundos. Con la presión ejercida se origina una zona de trituración inmediata alrededor del taladro, seguidamente se presentan fracturas radiales que se propagan a través del macizo rocoso. Seguidamente, la expansión los gases calientes produce el desplazamiento del material hacia el frente libre: La eficiencia del proceso va a depender del adecuado confinamiento del explosivo, con un mal confinamiento se produce una reducción en la energía transmitida a la roca.

El diseño de malla (burden y espaciamiento), la densidad del explosivo y su secuencia de retardos influyen de manera directa la dirección del colapso del banco. Además, en las operaciones que se ubican a gran altitud, las condiciones atmosféricas llegan a influir en la combustión de secundaria de ciertas partes del explosivo, reforzando la necesidad reforzar las mezclas. Por ello el proceso de voladura se debe entender como un sistema integrado donde la geología, la química explosiva y un diseño ingenioso interactúan para la maximización de la eficacia y seguridad.

2.5. Uso de Explosivos

2.5.1. Tipos de explosivos utilizados

Existen diferentes tipos de explosivos para voladura, y su elección depende del tipo de roca y las condiciones de la operación. Por ejemplo, el ANFO es uno de los explosivos más comunes debido a su bajo costo y facilidad de uso. Es ideal para rocas secas, ya que no es resistente al agua. Otros, por ejemplo, son las emulsiones e hidrogeles. Estas mezclas contienen agua, nitrato de amonio y otros combustibles. Son más potentes y resistentes al agua que el ANFO, lo que los hace adecuados para minas con condiciones húmedas o para rocas más duras. Finalmente, se utiliza la clásica dinamita, aunque menos común hoy en día, sigue utilizándose para aplicaciones especiales o para iniciar la detonación de otros explosivos.

La voladura es un pilar fundamental en la minería moderna, permitiendo la extracción de grandes volúmenes de mineral de manera eficiente. Su éxito depende de una planificación rigurosa, un diseño de voladura preciso y el uso de la tecnología adecuada para garantizar la seguridad y la productividad. Para investigadores como Kolev y Tsonev (2022), estos productos se presentan como una alternativa de bajo coste, menor riesgo y con la misma

intensidad explosiva que otros componentes más caros utilizados por compañías mineras de gran prestigio.

Mientras tanto, Giraldo (2020) nos demuestra que el porcentaje de aluminio incorporado para la formulación del explosivo tipo ANFO modifica el comportamiento energético del explosivo, influyendo de manera directa al control del contorno y el tamaño de fragmentación de la roca. Al tener un bajo porcentaje de aluminio se suele tender a favorecer una liberación de energía más controlada, resultando beneficioso en bancos finales o zonas próximas a taludes definitivos, donde su objetivo principal es minimizar la sobre rotura y la preservación de la estabilidad geomecánica.

2.5.2. Planificación para el uso de explosivos

La planificación para el plan operativo de voladuras son actividades previas, durante y después de poner en marcha la estrategia con el fin de garantizar un proceso seguro y eficiente, para ello es importante entender que se realiza en cada etapa como en las siguientes referidas:

A) Etapa previa

La evaluación geotécnica no se limita a la identificación de las rocas, sino también al análisis de la resistencia a compresión simple (RCS), módulo de elasticidad, densidad, presencia de discontinuidades, la orientación de fracturas y grado de alteración. Al usar estos parámetros se determina el factor de carga, el burden y el espaciamiento óptimo.

El marcado del terreno debe de considera a la geometría del banco, la altura efectiva, el ángulo del talud y la proyección de desplazamiento del material. En esta fase se crean errores que alteran la distribución de energía y generan una sobre rotura o la fragmentación es deficiente.

La perforación, por su parte, exige control de diámetro, profundidad y verticalidad. Si al momento de perforar existe una desviación se afecta la distribución del explosivo y la eficacia de la detonación. Para el ANFO aluminizado la precisión en profundidad es clave para evitar el exceso de energía en la base del banco o la pérdida de confinamiento.

El diseño posee ajustes específicos que rigen la carga de los taladros, los cuales van a definir la columna explosiva, el taco (stemming), la proporción de aluminio y la distribución interna del explosivo. Un confinamiento equivocado puede generar proyección excesiva de los fragmentos debido a la elevación de la temperatura y presión característica de los explosivos metalizados

B) Etapa de ejecución

Durante la fase de la ejecución, el control de los sistemas de iniciación es crítico. Al implementar los detonares electrónicos, como sistemas programables de alta precisión, nos permite distribuir la energía en secuencias milisegundo a milisegundo, reduciendo las vibraciones y se optimiza el desplazamiento del banco.

La verificación de las secuencias de disparo no es solo la comprobación de conexión, sino la validación de la simulación temporal de la liberación de energía. En el uso de explosivos aluminizados, donde existe la presión prolongada por la oxidación de aluminio, la secuencia temporal influye directamente en la interacción entre taladros y el control de las vibraciones (PPV)

Evitar fallas o detonaciones incompletas requiere pruebas de continuidad eléctrica, inspección del circuito y el despeje total del área. En un explosivo que posee una mayor energía térmica, con una sola falla parcial se puede generar inestabilidad residual o en los casos de taladros cargados sin detonar representan riesgo operativo.

C) Etapa posterior

Luego de haber sucedido la explosión se debe inspeccionar el área, evaluando la fragmentación, proyección de roca, estabilidad del talud y posibles daños colaterales. A dicha observación se debe incluir análisis granulométrico para determinar el P80 y comparar resultados con los objetivos del diseño.

El manejo de residuos contempla tanto material suelto como restos de explosivo no detonado. En el caso del aluminio, debe verificarse que no existan acumulaciones de material fino que puedan representar riesgo en condiciones de humedad o confinamiento. Se debe verificar posibles taladros fallidos. Realizar inspecciones técnicas antes de permitir el ingreso de maquinaria pesada. Si aún se cuenta con la presencia de explosivo aluminizado no detonado se inician protocolos de neutralización específica debido a su mayor energía potencia. Finalmente, se hace un proceso de retroalimentación técnica: análisis de vibraciones registradas, comparación de fragmentación obtenida versus proyectada y evaluación económica del rendimiento.

2.5.3. Explosivos aluminizados

Los explosivos aluminizados son mezclas explosivas que contienen aluminio u otros componentes metálicos con la finalidad de modificar sus características energéticas. La

incorporación de aluminio favorece la liberación de energía y potencia del explosivo durante la reacción explosiva y modifica el comportamiento de los gases generados durante la detonación debido a su alto calor de combustión.

El desempeño de un explosivo aluminizado depende de diversos factores relacionados con la composición de la mezcla, la distribución del componente metálico, el balance de oxígeno, la densidad, las condiciones de confinamiento y las características del macizo rocoso. Por ello, la incorporación de aluminio no debe analizarse de manera aislada, sino en relación con las condiciones específicas de diseño y aplicación de la voladura.

Desde la física y la termoquímica de la voladura, los puntos clave que sustentan esa afirmación son:

- **Post-detonación y energía tardía:** Puesto que la oxidación del aluminio sucede a una escala temporal un poco más grande que la de los reactivos orgánicos principales, una gran cantidad de su calor se libera durante el periodo de expansión de los gases de detonación. Esto aumenta más la energía de empuje (heaving energy) que la energía de choque inicial (brisance).
- **Dependencia del Balance de Oxígeno (BO):** Si el explosivo carece del oxidante necesario (como nitrato de amonio o percloratos), el aluminio no podrá oxidarse completamente a Al_2O_3 . En esos casos, parte del aluminio solo reaccionará al salir del taladro y mezclarse con el oxígeno del aire atmosférico (*afterburning*), lo cual produce un espectáculo térmico o resplandor, pero pierde eficiencia mecánica para romper o mover la roca.
- **El Confinamiento y la Geometría:** Para que el calor extremo generado por el aluminio sea transformado eficientemente en trabajo mecánico (presión $P \times \Delta V$), el taco, el diámetro de perforación y el acoplamiento del explosivo deben retener los gases el tiempo suficiente. Si el confinamiento falla prematuramente (por un escape de gases rápido), la energía térmica del aluminio se disipa hacia la atmósfera en lugar de fragmentar el macizo rocoso.

En consecuencia, la utilización de explosivos aluminizados requiere evaluar conjuntamente sus propiedades químicas, físicas y operativas. La determinación de la proporción adecuada y su efecto sobre indicadores como la fragmentación, el P80, el factor de potencia y las vibraciones debe establecerse mediante evaluaciones técnicas y mediciones de campo.

2.5.4. Emulsión

El explosivo tipo Vertex corresponde a una emulsión diseñada para operaciones de minería a tajo abierto que requieren un mayor control en condiciones de humedad y existe una elevada resistencia del macizo rocoso. Se trata de una emulsión explosiva estabilizada, combinando una fase oxidante (principalmente nitrato de amonio en solución acuosa) con una fase combustible dispersa, lo que genera una matriz homogénea con alta densidad energética y buena resistencia al agua.

Para el caso del proyecto de Antapaccay, el Vertex representa una gran alternativa técnica frente al ANFO convencional y el aluminizado, especialmente por la zona donde se ubica la presencia de agua o la variabilidad geomecánica lo que exige una mayor tasa de estabilidad del explosivo dentro del taladro.

En la composición de la emulsión tipo Vertex están compuestas por: Fase oxidante principal, constituida predominantemente por una solución concentrada de nitrato de amonio (NH_4NO_3), actuando como agente oxidante. Para algunos casos se incorporan nitratos adicionales, como nitrato de sodio (NaNO_3) o nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), teniendo como objetivo mejorar la estabilidad térmica, balance de oxígeno y ayudar a resistir bajas temperaturas. El nitrato de amonio es responsable de suministrar el oxígeno necesario para la reacción explosiva constituyendo el componente determinante para obtener la energía química disponible.

En la fase combustible, se compone por aceites minerales, combustibles hidrocarbonados o parafinas, dicha fase proporciona el material reductor necesario para la reacción de oxidación. Para alcanzar el equilibrio químico ideal, el combustible reacciona con el oxidante liberando gases de alta temperatura (principalmente CO_2 , N_2 y vapor de agua), responsables de la presión expansiva que fractura la roca. El balance del oxígeno y el combustible se vuelve un parámetro crítico, ya que un exceso de oxidante generaría gases tóxicos, mientras si hay un exceso de combustible disminuye la eficiencia energética.

Para el agua estructural, a diferencia de lo que pasa en el ANFO, las emulsiones contienen una fracción significativa de agua, la cual conforma una parte de la fase oxidante. El agua reduce ligeramente la energía teórica por unidad de masa, esto permite mejorar la estabilidad térmica, la seguridad de almacenamiento y la resistencia frente a las fuentes accidentales de ignición.

Los agentes emulsificantes están compuestos tensioactivos por mezclas en fase acuosa oxidante y fase oleosa combustible, permitiendo su estabilización. Con estos agentes se reduce la tensión la tensión interfacial y generan una estructura microscópica estable del tipo “agua en aceite”. Si no se contara con las emulsificaciones adecuadas, la mezcla se separaría, perdiendo uniformidad.

2.5.5. Diseño de voladuras con explosivos aluminizados

El diseño de voladuras con explosivos aluminizados requiere una planificación rigurosa que considera la geometría del banco, las condiciones del taladro y la resistencia del macizo rocoso. La potencia del explosivo es más alta, lo que exige un ajuste de parámetros fundamentales, como la longitud de la columna explosiva, el espacio entre las perforaciones y la carga por taladro. Asimismo, para regular el desplazamiento de la roca sin ocasionar un perjuicio excesivo a las estructuras cercanas, es preciso que la secuencia de disparo esté correctamente programada.

El diseño debe incluir los cálculos de la presión de detonación, el volumen de roca que se va a fragmentar y la energía específica disponible. Estos estándares permiten lograr un equilibrio entre la administración de costos, la eficacia operativa y la seguridad. La geometría del banco constituye un punto de partida, debiéndose analizar la altura efectiva el ángulo del talud, el diámetro de perforación y la indicación de los taladros. Si se ubica en bancos altos, el incremento de energía del explosivo aluminizado se favorece de una mejor fragmentación en la base, lo que reduce la necesidad de subperforaciones. Aunque si no se controla el burden y el espaciamiento es erróneo, se puede generar una sobre rotura y pérdida de estabilidad en los taludes finales.

La secuencia de disparo adquiere una especial relevancia para la programación de retardos milisegundo a milisegundo permitiendo controlar el desplazamiento progresivo del banco, minimizando las vibraciones (PPV) y se evitaría interferencias destructivas entre taladros. En explosivos aluminizados, la presión gaseosa se mantiene durante más tiempo, si se tiene un mal diseño se amplifica las vibraciones o se generan proyecciones excesivas de fragmentos.

Para un correcto calculo el diseño técnico debe de incorporar: Presión de detonación estimada, energía específica, volumen real de la roca a fragmentar, predicción de vibraciones y análisis granulométrico proyectado (P80 esperado).

Con la inclusión de parámetros se causan efectos pertinentes de anotar se trata de la manipulación de elementos compuesto de aluminio.

Tabla 1 Interacción del aluminio con los parámetros de voladura

Confinamiento	El aluminio, para garantizar su efectividad, necesita de un taco de al menos 30 diámetros de taladro. De ser tomada incorrectamente la medida, es posible que exista pérdida de ondas aéreas y proyectiles.
Burden	Si el burden es mayor a los 5.5 m en roca de tipo diorita, la onda de choque primaria no será suficiente para fracturar eficazmente y el aditivo aluminizado será incapaz de compensar esa falla.
Espaciamiento	Un espaciamiento muy amplio (>6 m) genera zonas no fracturadas entre taladros; el aluminio no ayuda a conectar fracturas.
VOD	El aluminio no mejora la VOD; de hecho, porcentajes altos (>15%) pueden reducirla al alterar el balance de oxígeno.
Humedad	La eficiencia del aluminio decrece cuando se trate de taladros rodeados de un clima húmedo, por ello se recomienda el uso de la emulsión base con Kallpex.

Fuente: Elaboración propia

A) ANFO aluminizado

El ANFO aluminizado es una formulación basada en la mezcla de nitrato de amonio y combustible, a la que se incorpora aluminio metálico con la finalidad de modificar sus características energéticas.

En comparación con el ANFO convencional, la incorporación de aluminio puede incrementar la energía disponible de la formulación y modificar el comportamiento de los productos de reacción. Sin embargo, el desempeño de la mezcla depende de la proporción de sus componentes, la distribución del aluminio, la densidad y las condiciones de confinamiento.

Giraldo (2020) analizó la formulación de ANFO aluminizado para voladuras en minería subterránea y evaluó la influencia de diferentes proporciones de aluminio sobre el comportamiento de la mezcla. Sus resultados evidencian la importancia de establecer una formulación adecuada, debido a que la cantidad de aluminio influye en el desempeño energético del explosivo.

Por tanto, el ANFO aluminizado debe evaluarse considerando tanto sus propiedades energéticas como las condiciones específicas de aplicación. La incorporación de aluminio no constituye, por sí sola, una garantía de mejora del resultado de la voladura, por lo que su desempeño debe determinarse mediante indicadores técnicos y mediciones de campo.

Tabla 2 Indicadores técnicos sobre los tipos mezclas explosivas ANFO

Tipo de Explosivo	Resistencia al Agua	Densidad (gr/cm3)	Velocidad de detonación(m/s)
ANFO Estándar	Nula	0.8	Baja (3,200 m/s)
ANFO Aluminizado	Nula	0.85	Baja - Media (3,500 m/s)
Emulsión Pura / Matriz	Excelente	1.15 - 1.25	Muy Alta (5,500 m/s)
Heavy ANFO Aluminizado	Excelente	1.20 - 1.35	Alta (4,800 - 5,200 m/s)

Fuente: Elaboración propia

B) Kallpex

El kallpex es una emulsión que contiene principalmente materiales sólidos como el aluminio. Su utilidad deriva de su adición a mezclas explosivas con el fin principal de incrementar la energía útil en la fase de presión de gases post-detonación. Como producto, el compuesto se integra hasta por cuatro componentes:

- Nitrato de amonio: Concentración menor al 50%
- Agua: Concentración menor al 50%
- Diesel B5 S-50: Concentración menor al 10%
- Aluminio: Concentración mayor al 20%

A diferencia del ANFO tradicional, cuya estructura es granular, el Kallpex posee una matriz homogénea que garantiza un mejor contacto con las pruebas de taladro, esto favorece al confinamiento energético. Al tener un elevado porcentaje de aluminio (mayor al 20%) introduciendo una reacción exotérmica secundaria por oxidación del aluminio que incrementa la temperatura de detonación prolongando la presión gaseosa posterior a la onda de choque inicial. Con este comportamiento resulta particularmente eficiente en rocas de alta resistencia y baja fracturación natural

Para ser específicos, existen cuatro riesgos que justifican su control: a) inhalación del productor, b) Contacto con la piel, c) Contacto con los ojos y d) Ingestión. Los síntomas dependen de la sobreexposición a largo plazo con el producto sin el equipo de protección personal adecuado, conforme al tiempo de exposición será pertinente asistir al centro de salud más cercano a efecto de la atención inmediata.

Fuera de estos aspectos personales producto de su manipulación, también es parte de sus riesgos la posibilidad de incendios de ser material inflamable. Tomando en cuenta su concentración de agua, es decir, componente acuoso, toca advertir sobre los riesgos de su vertiente incidental.

Ahora bien, corresponde señalar respecto de su manipulación se debe señalar que el mismo no debe ser manipulado en lugares con índice de altas temperaturas o fuentes de calor, chispas o llamas; sino, todo lo contrario, debe ser puesto en zonas correctamente ventiladas, en todo momento se debe mantener la distancia con el producto por tiempos prolongados de tiempos, evitar el consumo de alimentos en ambientes cercanos a su lugar de almacenamiento.

Específicamente sobre su almacenaje, corresponde decir que esta debe ser un área limpia y seca. Se encuentra prohibido su depósito en zonas donde también se guarden agentes reductores fuertes (ácidos, materia orgánica, cromatos, entre otros.). Finalmente, para su recojo se deben utilizar camiones cisternas con cubitanque y dirigidos hacia silos.

Sus características principales físicas y químicas son las siguientes:

- Estado físico: Emulsión
- Color: Gris
- Punto de inflamación: 66 °C +/- 2 °C
- Presión de vapor: 7.38 mmHg
- Densidad: 1.40 – 1.70 Kg/L

- Solubilidad: Insoluble en agua

Con estos métodos podemos afirmar, entonces, que este producto tiene una estabilidad química regular para su naturaleza, siempre y cuando se encuentre en condiciones normales de presión temperatura, además que el mismo no polimeriza. No obstante, como se había anticipado es función esencial prohibir su almacenaje en lugares cargados de calor, con chispa o fuego, además de su separación de otros materiales químicos como oxidantes, peróxidos, cloratos, entre otros, ya que el mismo tiene como resultado natural de su descomposición al óxido de nitrógeno.

La evaluación del desempeño del Kallpex en una operación minera debe realizarse mediante indicadores técnicos que permitan comparar su comportamiento con otras mezclas explosivas. Entre estos indicadores se encuentran la fragmentación, el P80, el factor de potencia y la velocidad máxima de partícula., así como la velocidad en la detonación, también posee resistencia al agua, lo que hace efectivo su uso para taladros húmedos o condiciones subterráneas, y diferentes propiedades que se desglosan en los siguientes cuadros:

Tabla 3 Propiedad del Kallpex

Estado físico	Aditivo energético
Forma en que se presenta	Solución acuosa
Color	Gris
Olor	No descrito
PH	No aplicable
Punto de fusión / punto descongelamiento	No disponible
Punto de ebullición, punto inicial de ebullición y rango de ebullición	No disponible
Punto de inflamación	66c + 2c T corregida a nivel de mar 72c
Límite de explosividad	No disponible
Presión de vapor	No hay información
Densidad relativa del vapor (aire;1)	No disponible
Densidad	1.40 8-1.70 kg/L

Solubilidad	Insoluble en agua
Coeficiente de partición	No aplica
Viscosidad	15000cp a 35000cp
Temperatura de autoignición	No disponible
Temperatura de descomposición	No disponible
Umbral de olor	No disponible
Tasa de evaporación	No disponible
Otro	No disponible

Fuente: Elaboración propia

El producto Kallpex por su incipiente naturaleza explosiva y compuestos químicos, presenta diversas alteraciones en la combinación con algunas sustancias que alteran su estabilidad o provocan reacciones peligrosas, entre estas se encuentran las siguientes:

- Combustibles líquidos
- Solventes orgánicos
- Ácidos fuertes
- Materiales corrosivos

Estos materiales pueden afectar a la composición de Kallpex o generar sensibilizaciones malogrando su uso. Asimismo, se deben evitar el contacto con fuentes de calor, chispas, electricidad estática ni con otros explosivos sin autorización técnica, ya que la interacción de estos químicos incrementa el riesgo de detonación accidental, por ello, el control del uso de los mencionados materiales es fundamental para garantizar la seguridad durante su almacenamiento, transporte y el uso en operaciones de voladura.

Los vehículos utilizados para transportar el Kallpex deben estar debidamente autorizados y señalizados, y el traslado debe realizarse de acuerdo con la normativa vigente sobre el transporte de explosivos industriales y bajo condiciones de seguridad rigurosas. Los envases originales y sellados deben ser utilizados para transportar el material, asegurándose de que estén protegidos de las fuentes de ignición, la humedad y los golpes.

Asimismo, el personal a cargo debe tener la documentación apropiada y haber sido capacitado en el manejo de explosivos; además, debe contar con rutas autorizadas y estrategias

de contingencia para casos de emergencia. Si se cumplen estos procesos, se asegura la seguridad del material hasta su llegada al sitio de uso y se reduce significativamente el riesgo de accidentes.

De esta manera, la norma que rige el transporte del aditivo aluminizado hasta el centro de operación minera se encuentra regulado por la Ley N° 28256 y su reglamento operativo, el Decreto Supremo N° 021-2008-MTC, Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, y ceñirse a lo establecido en el Libro Naranja de las Naciones Unidas Para efectos del diseño del plan operativo en Antapaccay, la norma impone obligaciones técnicas, en primer lugar, la licencia de conducir especial de categoría A-IV como la obligatoriedad de emplear vehículos con señalización de riesgo visible mediante rótulos, el equipamiento técnico de kits para contingencias y control de derrames, y la presencia obligatoria en cabina de la Guía de Remisión junto a la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) del producto.

Por último, también dentro del marco legal, pero en función a la autorización de manipulación y uso, tenemos a la Ley N° 30299 Ley de armas de fuego, municiones, explosivos, productos pirotécnicos y materiales relacionados de uso civil y su reglamento, este marco regula la fabricación, almacenamiento, transporte, venta y uso de explosivos industriales como el Kallpex.

Este reglamento establece las demandas de autorización, control y supervisión, así como los deberes de las personas y entidades jurídicas involucradas, garantizando que el material explosivo se utilice con seguridad y dentro del marco legal para asegurar que el plan operativo propuesto respete las reglas vigentes y los estándares exigidos por el Estado, es fundamental su implementación.

Para garantizar la integridad física del personal implicado, es esencial utilizar elementos de protección personal adecuados para manejar el Kallpex. Estos incluyen, en función de la etapa del proceso, guantes duraderos, cascos de seguridad, ropa antiestática, lentes protectores, zapatos de seguridad y protección para los oídos. Además, el personal debe estar correctamente formado en la gestión segura de explosivos y en la detección de riesgos relacionados. Es fundamental seguir los procedimientos de seguridad y usar correctamente estos componentes para evitar accidentes durante la carga, el transporte y la preparación de material explosivo.

En primer lugar, al usar guantes resistentes a las sustancias químicas se evita el contacto dérmico con los nitratos y combustibles presentes en la emulsión. La exposición prolongada

puede generar irritación cutánea o la absorción de compuesto potencialmente nocivos. Al usar ropa antiestática se protege al usuario de la acumulación eléctrica estática en ambientes secos lo que generaría una chispa de activación para el aluminio metálico y al momento de usar el equipo de protección se reduce el riesgo de ignición.

Los lentes de protección herméticos son necesarios para evitar el contacto ocular con la emulsión, de manera particular a operaciones de carga o mantenimiento de equipos. El contacto accidental con este tipo de elemento puede generar irritación severa. Con el casco de seguridad y uso de zapatos de seguridad con puntera reforzada protegen frente al riesgo mecánico de la carga de equipos de bombeo, manipulación de cartuchos o el manejo de mangueras de carga. Así mismo es obligatorio el uso de protección aditiva en zonas de operación de carga.

Para asegurar que el Kallpex se implemente correctamente en las operaciones mineras, debe estar bajo supervisiones operativas, técnicas y administrativas. Estos controles incluyen la verificación de la cantidad usada, el control del diseño de la voladura, el cumplimiento de los procedimientos operativos estándar y la evaluación de los resultados después de que se ha realizado la voladura. Asimismo, es preciso conservar un control minucioso sobre el empleo, la conservación y la distribución de explosivos y llevar a cabo auditorías de seguridad con frecuencia. Implementar estos controles permite prevenir incidentes, optimizar el rendimiento del explosivo y asegurar que la normativa en vigor se cumpla.

Para usar en el ámbito operativo, se debe llevar un registro detallado de cantidad explosivo cargado por taladro, el número de taladros utilizados, proporción exacta de aluminio en la formulación, condiciones de humedad de taladro, la hora y condiciones ambientales al momento de gestionar la explosión. Además de una supervisión directa durante la carga para evitar errores como sobrecarga, una mala distribución o deficiente confinamiento.

2.5.6. Clasificación de explosivo

Para comprender los explosivos son cualquier sustancia que, ante un estímulo externo como calor, percusión y/o roce, reaccionando rápidamente convirtiéndose en gases y se libera energía en forma de calor, presión y radiación en una fracción de tiempo. Dentro de esta categoría existen los llamados explosivos permisibles que son de seguridad y son aquellos preparados para ser usados en minas de carbón donde el ambiente posee atmosferas inflamables de polvo y gris, su característica principal que tiene es la baja temperatura de explosión que

genera una flama corta. La activación de este tipo de explosivos se realiza mediante detonadores permisibles y equipos certificados para áreas clasificadas como explosivos y ohmímetros certificados para áreas clasificadas (Salamanca et.al, s.f).

Por lo tanto, la clasificación depende de criterios esenciales como la sensibilidad y la velocidad de reacción. En la minería y la construcción predominan los explosivos secundarios y altos explosivos, dado que ofrecen potencia controlada y seguridad relativa frente a los riesgos de manipulación.

A) Explosivos primarios

- Son sensibles al impacto por fricción o calor.
- Se usan como iniciadores para activar otros explosivos.
- Ejemplo, el fulminato de mercurio.

B) Explosivos secundarios

- Se emplean usualmente en minerías, demoliciones y otras obras.
- Son menos sensibles, requieren un iniciador para detonar.
- Ejemplo, el nitrato de amonio.

C) Altos explosivos

- Generan gran energía en poco tiempo.
- La velocidad de detonación es mayor.

D) Bajos explosivos

- La velocidad de reacción es menor.
- Suelen usarse en pirotecnia, pólvoras y propulsión de cohetes.
- No se aplican en minería a gran escala

2.6. Mina Antapaccay

La mina Antapaccay está situada en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, Cusco, Perú. Se halla a una altitud de 4 100 metros sobre el nivel del mar y se encuentra a alrededor de 256 km al sureste de la ciudad de Cusco y a unos 265 km al noreste de Arequipa. Geológicamente, Yauri está ubicado en la parte sureste del cinturón Andahuaylas. Su diversidad metalogenética se ha puesto de manifiesto gracias a la existencia de los yacimientos

tipo skarn de Tintaya (Cu-Au-Ag-Mo) y el proyecto Las Bambas (Cu-Au-Ag-Mo), así como por el hallazgo de nuevos depósitos porfiríticos de cobre con potencial económico, como son Quechuas (Cu) y Haquiri (Cu).

Antapaccay es un yacimiento pórfido de cobre que tiene valores marginales de oro y plata; la mineralización de cobre está diseminada y también en venillas hospedadas en monzonitas y diorita. Cuando el cobre entra en contacto con las rocas sedimentarias calcáreas del cretácico, forma cuerpos irregulares de skarn; además, se forman stockwork en cuarcitas y hornfels con valores de cobre, aunque estos son solo una pequeña parte del total de los recursos.

- Antapaccay zona norte tiene 300 x400 m.
- Antapaccay zona sur es el más extenso con 1,300 x250 a 430m.

2.6.1. Uso de explosivo en las minas del departamento del Cusco

El uso de explosivos es una práctica fundamental en la minería del departamento del Cusco, una de las regiones con mayor actividad minera en Perú. La voladura controlada permite la fragmentación de la roca para la extracción de minerales, principalmente el cobre, que es un pilar de la economía regional. En las operaciones de gran escala, como el realizado en Antapaccay se replica en otras empresas del conglomerado Glencore, como, por ejemplo, la operación en Antamina, en Áncash. Su actividad está estrechamente vinculada a la cadena de producción del sur del Perú), se emplean tecnologías de vanguardia para maximizar la eficiencia y seguridad.

A nivel operativo, el uso de explosivos en la región Cusco requiere la implementación de sistemas de monitoreo de vibraciones (VVP) y una sobrepresión aérea, especialmente en operaciones cercanas a comunidades andinas o infraestructura crítica. El control de parámetros como la velocidad de detonación (VOD), la energía específica y la secuencia de retardos nos permite la optimización de fragmentos y la reducción de impactos ambientales. Si evalúa la post voladura con un análisis granulométrico constituyendo una herramienta clave para la determinación de la eficacia real y la diferencia con la esperada.

Las condiciones climáticas del Cusco, caracterizadas por temporadas de lluvias intensas y variaciones térmicas propias de la altitud andina influyen en el desempeño de los explosivos. Con las lluvias los taladros se podrían ver afectados en el rendimiento de determinadas mezclas obligando a seleccionar formulas resistentes a la humedad y con adecuada estabilidad química para el clima de la zona. Dicha variable técnica incrementa la necesidad de supervisión especializada durante la etapa de carga y detonación.

Desde el punto de vista socioambiental, el uso responsable de explosivos forma parte de la gestión integral de riesgos en la actividad minera. El correcto cumplimiento normativo no solo responde a exigencias legales, sino también a estándares de responsabilidad empresarial orientados a reducir impactos negativos y fortaleciendo la legitimidad de la actividad extractora en la región. La diferencia entre minería formal e informal no solo radica en la autorización administrativa, sino en la implantación sistemática de controles técnicos, capacitación especializada y trazabilidad en el uso de materiales explosivos.

En consecuencia, el uso de explosivos en el departamento del Cusco se debe entender como un componente técnico de alta especialización que requiere una planificación, regulación estricta y supervisión constante. Al aplicarse de manera correcta se contribuye al desarrollo económico regional; sin embargo, si se maneja de manera inadecuada puede generar riesgos significativos tanto para los trabajadores como para el entorno social y ambiental.

2.6.2. Fragmentación para mejor rendimiento

A tenor de León (2021) la fragmentación producida por la voladura primaria es el principal factor que condiciona el rendimiento operativo de los equipos de carguío y acarreo. Un quiebre inadecuado produce la presencia de bolonería, la que a su vez, merma la velocidad de las palas y acelera el desgaste mecánico en la planta de trituración primaria. En última instancia, el éxito del proceso dependerá de la proporción técnica adecuada entre la energía química del taladro que se aplica y la fragmentación fina en el fin de maximizar el tonelaje por hora.

2.6.3. Parámetro de diseño de voladura

A) Velocidad de detonación

La velocidad de detonación (VOD) es la rapidez con la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo. Por lo general se mide en metros por segundo (m/s) y varía desde aproximadamente 2 000 m/s con los explosivos menos energéticos, pudiendo llegar a 7 000 m/s en explosivos alta potencia.

Este parámetro no está reducido a la velocidad en la cual explota, más bien se considera la velocidad al que el frente de reacción química supersónica recorre el explosivo generando una onda de choque extremadamente intensa. Esa onda es que fractura la roca.

Si el explosivo es colocado en rocas muy duras y compactas, las cuales poseen muchas formaciones ígneas presentes en operaciones del sur del Perú, el uso de VOD altas favorecerá la fracturación porque transmite una onda de choque intensa superando rápidamente la resistencia a compresión de la roca. Sin embargo en rocas más blandas o fracturadas, una VOD excesiva generaría una sobre trituración o se desperdiciaría energía en vibraciones sin mejorar de forma real la fragmentación.

B) Diseño de malla de perforación

El diseño de malla consiste en la disposición espacial de los taladros ubicados dentro del banco minero. Define la distancia entre perforaciones y determina la distribución de la energía explosiva dentro del macizo rocosos.

La malla está compuesta principalmente por: burden (B) el cual es la distancia entre los taladros y la cara libre, espaciamiento (E) considerado la distancia entre los taladros dentro de una misma fila, altura del banco, subperforación, longitud de taco. Cada uno de estos elementos influye directamente en la eficiencia al momento de fragmentar.

El burden (B) se considera la variable más delicada del diseño, representando la resistencia inicial que la roca opone a la energía explosiva. Si el burden es muy pequeña la expulsión violenta de material, aumenta la proyección de roca y se genera un desperdicio de la energía. En cambio si es demasiado grande la fragmentación sería deficiente, apareciendo “pies de banco” o material sin romper y se incrementaría la necesidad de voladuras secundarias. La forma correcta de calcular es calcular la energía de la explosión, la densidad de la roca y el diámetro del taladro.

El espaciamiento va a determinar cómo interactúan las ondas de choque entre los taladros vecinos. Si el espaciamiento es adecuado, las fracturas generadas por cada una de las detonaciones se intersecan, creando patrones uniformes de fragmentación. Con un espaciamiento excesivo las zonas no son fracturadas de manera óptima y aparecen bloques sobredimensionados. Por el contrario, si es reducido existe la sobretrituración y aumenta el consumo de explosivos sin mejora en el proceso.

La subperforación es la longitud adicional que se perfora por debajo del nivel del banco establecido, la finalidad de la subperforación es evitar el estancamiento de material sin fragmentar en la base. Si no se hace correctamente se crearía un “pie de banco” dificultando el siguiente ciclo de perforación.

La malla de perforación no funciona de manera aislada, más bien está relacionada con la velocidad de detonación, la densidad del explosivo, factor de carga y el grado de confinamiento. Un explosivo más energético permite ampliar ligeramente la malla sin perder fragmentación, uno menos energético exige reducir distancias para garantizar rupturas adecuadas. Diseñar mallas en esencia distribuye energía en el espacio tridimensional del banco de macizo rocoso.

C) Estándares de sostenibilidad y calidad

Estos enfoques garantizan una mayor rentabilidad en la mina de Antapaccay, porque garantizan que el plan de voladura no solo cumpla con las exigencias legales, sino también sea un éxito, esta práctica se dividió en dos ámbitos:

Lo más importante es la seguridad personal, donde existen protocolos estrictos para la manipulación y el uso del explosivo combinado siempre que cumpla la norma, asimismo, no se deben monitorear gases tóxicos inmediatamente después de la voladura, esto garantiza que el aire sea seguro antes de que los equipos ingresen a trabajar. Se debe asegurar que las voladuras no generen daño a las comunidades cercanas, se miden las vibraciones y el ruido. Es muy esencial que el explosivo aluminizado que está compuesto por aluminios o nitratos no debe filtrarse por el agua, entonces se debe mantener un continuo monitoreo del agua.

Para que la fragmentación sea perfecta es esencial que el tamaño de la roca después de la voladura sea pequeño para que agilice el trabajo de la extracción de cobre. El proceso de voladura debe estar diseñado para reducir el consumo de la mina Antapaccay, debe reducirse por lo menos un 10% del consumo, gracias a la combinación del aditivo Kallpex. Medir la

velocidad de detonación del explosivo aluminizado debe ser mayor para que la fragmentación sea más fácil de manejar.

Por otro lado, la detonación de este tipo de explosivo tiene efectos ambientales, en particular la liberación de gases como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, además de generar ruidos, vibraciones y ondas aéreas que tienen el potencial de dañar el entorno inmediato a la actividad minera.

Asimismo, el lanzamiento de fragmentos de roca y la alteración del macizo rocoso pueden incidir en la estabilidad del terreno y de las áreas cercanas. En esta línea, se deben incorporar acciones de mitigación, vigilancia y control ambiental para disminuir los efectos negativos., lo que asegura que la actividad de voladura se ejecute conforme a las normativas ambientales vigentes y a los principios de sostenibilidad.

2.7. Hipótesis

La implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva utilizada para voladuras en roca diorita en la empresa minera Antapaccay incrementará la eficiencia del proceso de voladura, mejorando la fragmentación fina de la roca (<1 pulgada) en al menos 2 puntos porcentuales respecto al uso de Vertex, manteniendo un factor de potencia ≤ 0.70 kg/t y una velocidad máxima de partícula (PPV) menor a 20 mm/s.

2.8. Variables

2.8.1. Variable dependiente

Material explosivo aluminizado

2.8.2. Variable independiente

Proceso de voladura



CAPÍTULO III

3. Marco metodológico

3.1. Ubicación y clima

3.1.1. Ubicación

El proyecto de investigación estuvo centrado en la minería de la región Cusco, la región Cusco se encuentra ubicada en el sur del país, está limitado con los departamentos de Junín, Madre de Dios, Puno, Arequipa, Apurímac y Ayacucho, con una extensión territorial de 71, 986 km². La investigación se realizó con el apoyo de la empresa minera Antapaccay ubicada en la zona sur del departamento de Cusco, provincia de Espinar a 4 m.s.n.m.

3.1.2. Clima

El área del proyecto Antapaccay está caracterizado por tener un clima frío y húmedo, en donde predominan dos estaciones definidas, por un lado, una estación húmeda entre los meses de noviembre a marzo, por otro lado, una estación seca entre los meses de abril a octubre, esto es común en la sierra.

La evaluación climática comprende las siguientes variables meteorológicas:

- Temperatura de 4,2°C a 10,2°C, en donde los meses más fríos son desde mayo a septiembre y los más calurosos de octubre a abril.
- La humedad varía entre 48% a 63% entre los meses de septiembre a abril.
- La precipitación fluvial comienza en el mes de octubre y noviembre, siendo su punto alto en el mes de enero y decrece gradualmente en los meses de abril.

3.2. Alcances y limitaciones

3.2.1. Alcances

El alcance de la investigación se enfocó esencialmente en un diseño de plan operativo para usar el aditivo aluminizado Kallpex en los explosivos destinados a la actividad minera. Para ello, se abarcó desde la selección de materiales adecuados para la manipulación segura y la aplicación controlada en escenarios de alta exigencia, el estudio comprendió la evaluación previa del área minera y la determinación del explosivo más adecuado de acuerdo a las condiciones específicas.

Se consideró la importancia de la voladura como etapa esencial para la eficiencia de las operaciones mineras, es así que se incluyó la formulación óptima de mezclas explosivas con el aditivo Kallpex, buscando incrementar la potencia energética frente a piedras de gran tamaño.

En general la investigación se plantea como un modelo replicable que permitió la eficiencia, reducir el costo de perforación y asegurar un manejo responsable de los materiales.

3.2.2. Limitaciones

La principal limitación de la presente investigación se concentra en que pese a realizar estudios previos sobre el uso del aditivo aluminizado Kallpex en la combinación con la dinamita, persiste la escasa evidencia científica sobre su aplicación en voladuras mineras, lo que restringe parámetros técnicos confiables, además esta práctica varía en ocasiones por las condiciones geológicas.

Otro aspecto técnico fue la manipulación y seguridad en la obtención, el transporte y el uso de las mezclas aluminizadas, dado que esto requirió protocolos estrictos y personal altamente capacitado, también influyó los costos elevados en la perforación y los ensayos del uso de esta mezcla aditiva con la dinamita y proyectarlo en el macizo rocoso de alta dureza.

3.3. Tipo y nivel de investigación

3.3.1. Tipo de investigación

El presente estudio fue de tipo aplicada, debido a que estuvo orientado a resolver un problema práctico relacionado con la optimización del proceso de voladura en la empresa minera Antapaccay, mediante la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva.

Asimismo, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que se sustentó en la medición y análisis de datos numéricos obtenidos de los procesos de voladura evaluados. En este sentido, se analizaron indicadores técnicos como la fragmentación, el P80, el factor de potencia y la velocidad máxima de partícula (PPV).

La naturaleza cuantitativa del estudio guarda correspondencia con el procedimiento de análisis aplicado, puesto que los datos obtenidos mediante la observación y el registro en la lista de cotejo fueron organizados y procesados mediante estadísticos descriptivos y medidas de comparación. Asimismo, se empleó la prueba t de Student para comparar los resultados de los indicadores técnicos entre los grupos de voladuras evaluados, con la finalidad de determinar las diferencias existentes en el desempeño de las mezclas explosivas convencionales y aquellas mejoradas con el aditivo Kallpex.

3.3.2. Nivel de investigación

La presente investigación correspondió a un nivel descriptivo, debido a que estuvo orientada a describir y analizar las características y resultados obtenidos a partir de la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en el proceso de voladura de la empresa minera Compañía Minera Antapaccay. Según Coronel (2023), los estudios descriptivos tienen como finalidad detallar las propiedades, comportamientos y características de un fenómeno mediante la observación y el registro sistemático de datos.

En ese sentido, la investigación describió el comportamiento técnico de las mezclas explosivas mejoradas con Kallpex, considerando indicadores como el porcentaje de fragmentación fina, el P80, el factor de potencia y la velocidad máxima de partícula (PPV). Asimismo, se registraron y analizaron los resultados obtenidos en las voladuras realizadas en roca diorita dentro de las operaciones de tajo abierto de Antapaccay.

De acuerdo al estudio, se permitió describir las condiciones de aplicación, almacenamiento y utilización responsable del aditivo Kallpex, así como los efectos observados en el rendimiento del proceso de voladura. Por ello, el nivel descriptivo resultó adecuado, ya que la investigación se centró principalmente en observar, registrar y analizar los resultados técnicos obtenidos durante las pruebas realizadas con mezclas explosivas.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Estuvo compuesta por la totalidad de todos los procesos de voladuras iniciales para la fragmentación de la toca maciza en el territorio minero de Antapaccay.

Criterios de inclusión: Esta técnica se usó para saber el volumen extractivo, características del macizo rocoso y del aditivo Kallpex. Lo que fueron considerados como los componentes directos e influyentes.

Criterios de exclusión: En esta investigación se excluyó a la cantidad de trabajadores.

3.4.2. Muestra

Para el autor Hernández et. Al. (2014), la muestra es un grupo pequeño caracterizado de la población, ya sea conformada por máquinas, personas, entre otras. De lo manifestado se puede observar que en la investigación no fue un tema de preocupación porque el enfoque es cuantitativo, donde los datos obtenidos importaron más la calidad que la cantidad, siendo así

la muestra fueron los procesos de voladura realizado en el campo territorial ubicado en la mina Antapaccay, en estricto en la zona denominada mina de tajo abierto.

3.5. Método, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Método de investigación

La investigación se desarrolló bajo el método cuantitativo, debido a que se orientó a la medición objetiva de variables relacionadas con el proceso de voladura minera. Según Hernández et al. (2014), el enfoque cuantitativo utiliza la recolección y análisis de datos numéricos para probar hipótesis y determinar relaciones entre variables.

En ese sentido, se evaluaron indicadores técnicos de desempeño como el P80, porcentaje de fragmentación fina, factor de potencia, PPV y comportamiento de la mezcla explosiva, a fin de determinar el impacto de la implementación del aditivo Kallpex en las voladuras realizadas en la mina Antapaccay. Asimismo, este método permitió comparar resultados obtenidos entre mezclas explosivas convencionales y mezclas mejoradas con Kallpex, verificando el cumplimiento de los objetivos e hipótesis planteadas.

3.5.2. Técnicas de recolección de datos

De acuerdo con lo razonado por Aranzamendi (2015) las técnicas representan métodos para la recopilación de información mientras que los instrumentos son las prácticas de estas herramientas que posibilitan la aplicación de las técnicas. En concreto, en el presente estudio se empleó la observación como técnica principal, esta técnica ayuda a registrar información a través de los datos *insitu*, y de esta forma los datos obtenidos ayudan a ser estudiados y procesados.

Siendo así, se empleó el análisis de observación directamente con la visión del investigador donde se denoto los resultados de la voladura de rocas macizas con explosivos mezclados con aditivos como el Kallpex y se determinó si esto cumplió con los objetivos esperados de la reducción del tamaño de fragmentación de la roca.

3.5.3. Instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos el instrumento crucial fue la lista de cotejo, porque con ello se logró recoger elementos esenciales de la investigación. El autor Hernández et al. (2014) indica que esta guía de observación es un medio en el que se registra información de las variantes de estudio para que sean procesadas estadísticamente.

3.6. Plan de análisis estadísticos de los datos

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante la recopilación y procesamiento de información obtenida de 30 procesos de voladura ejecutados en la empresa minera Antapaccay. Los datos fueron organizados en tablas comparativas considerando variables como porcentaje de fragmentación fina, P80, factor de potencia, velocidad máxima de partícula (PPV) y comportamiento técnico de la mezcla explosiva.

Posteriormente, se efectuó un análisis descriptivo de frecuencias, porcentajes, promedios y medidas comparativas, con la finalidad de identificar diferencias entre las voladuras realizadas con explosivos convencionales y aquellas mejoradas con el aditivo aluminizado Kallpex.

Asimismo, se evaluó el cumplimiento de los parámetros técnicos establecidos en la hipótesis, verificando si la implementación del aditivo Kallpex permitió incrementar la fragmentación fina en al menos 2 puntos porcentuales respecto al uso de Vertex, manteniendo un factor de potencia menor o igual a 0.70 kg/t y una PPV inferior a 20 mm/s.

Finalmente, los resultados fueron representados mediante cuadros y gráficos estadísticos para facilitar la interpretación técnica y la validación de la hipótesis de investigación.

3.7. Procedimiento metodológico de evaluación

El procedimiento metodológico para la evaluación del Kallpex constó en función a 4 ejes: a) el diseño de evaluación, b) la cantidad de pruebas realizadas, c) condiciones de comparación y d) el análisis estadístico.

Para el primer eje –diseño de evaluación– se tuvo en consideración la metodología giró en torno a comparación de resultados de voladura, para ello se tomó, por conveniencia las voladuras programadas por la propia empresa minera, a razón de ello se diferenció en dos grupos. El grupo de referencia (control) fueron voladuras ejecutadas con una mezcla explosiva convencional utilizada por la minera, ANFO con Vertex. Mientras el grupo experimental tuvo como mezcla explosiva al ANFO combinado con el 10% en peso de Kallpex como aditivo energético. El diseño consideró el control de variables intervinientes que podían afectar los resultados, entre ellos, el tipo de roca (dureza), geometría de perforación (se estandarizó el uso de mallas de perforación de 5.2. m x 5.0. m.), con una altura de 12 m., las condiciones climatológicas (nivel de humedad) y la regulación de la secuencia de iniciación entre taladros (6 ms) y filas (17 ms).

El segundo eje, el número de pruebas realizadas, fueron un total de 30, ejecutados en el año 2025, en un ambiente minero de tajo abierto, la determinación de las voladuras fueron las siguiente:

- 12 voladuras con emulsión Vertex (sin aditivo aluminizado).
- 10 voladuras con mezcla que incorporó Kallpex al 10%.
- 8 voladuras con otras mezclas (HA73G u otros), que no fueron consideradas en el análisis comparativo principal por no pertenecer a ninguno de los dos grupos de interés.

A partir de estos datos, se eligieron un total de 22 muestras. Este tamaño muestral sirvió para generar la comparativa deseada, esta dependió directamente de la disponibilidad operativa de eventos controlados y la necesidad metodológica de establecer un número adecuado de estudios comparables a efecto de poder crear resultados estadísticos paramétricos.

Como parte del tercer eje, para las condiciones de comparación, se tuvieron como condiciones de comparación al tipo de roca (diorita, 100-140 MPa), el burden y espaciamiento de la malla de perforación (5.2. m x 5.0 m), altura del banco (12 m), diámetro de perforación (estándar, 6 5/8"), la subperforación (1.2 m), longitud del taco (≥ 2.5 m con material granular seco), humedad del taladro ($<10\%$ de la profundidad), sistema de iniciación (detonadores eléctricos), retardos entre taladros y filas (6 ms y 17 ms, respectivamente). Para la medición estricta se tuvieron en cuenta los indicadores de fragmentación fina (porcentaje menor a una pulgada), P80 (tamaño de partículas por debajo del 80% del material), el factor de potencia (kilogramos por toneladas de roca fragmentada), velocidad máxima de partícula (PPV), el tiempo entre cada fila (ms) y el tamaño máximo de fragmento.

El cuarto, y último, eje, análisis estadístico empleado, se realizó el t de Student para muestras independientes, considerando la significancia a 0.005. La razón que engloba esta elección fue que permite la comparación entre dos tipos de información independiente (Kallpex y Vertex), así como permitir la prueba de normalidad de los indicadores (en este caso Shapiro-Wilk) y la homogeneidad de varianzas. La permisibilidad de esta metodológica permitió establecer la relación entre la mejora de fragmentación y la reducción del P80 así como su nivel de significancia, permitiendo al mismo tiempo la hipótesis planteada.

Las consideraciones sobre la metodología de evaluación coadyuvieron a la investigación a reducir el riesgo de sesgos, ya que se realizó un registro acerca de cada una de las pruebas realizadas. Dada su naturaleza y composición evaluativa toda prueba puede ser replicada en

función a las necesidades de otras unidades mineras y bajo otras condiciones de trabajo. Como parte final, se anota que una limitación fue que no fue posible realizar un cambio en la cantidad de aditivo aluminizado utilizado, ni tampoco la eficiencia de los taladros en ambientes con presencia de alto nivel de humedad o agua.





CAPÍTULO IV

4. Resultados y discusión

Objetivo específico 1 *Revisar los beneficios de utilizar explosivos con aditivos para la voladura en la actividad minera de la empresa minera Antapaccay.*

En este punto se crucial señalar los reportes de fragmentación y señalar las diferencias en las detonaciones realizadas, como aspectos en el campo de explosión, el tipo de roca, evaluación de la mezcla, que tan lejos se aleja del día de trasegado (pues según información mientras más alejado de este día, mayor la viscosidad), diferencias entre los porcentajes de material fino fragmentado (% fino (%-1’’)). Establecer una conclusión respecto de en qué tipos de rocas es más recomendable utilizar Kallpex y cuáles otras no.

Figura 1 Registro preliminar de detonación

Proyecto: 2-02-3645-012 Material: MINERAL Roca: DIO Malla: 5.0 x 5.8 m F.P: 0.973 Kg/t CO: 1100 Kg P80: 5.3’’ Top size: 18.2’’ % finos (%-1’’): 34.2 % Axb: 27.00	Proyecto: 2-02-3705-185 Material: MINERAL Roca: STW - DIO Malla: 5.2 x 6.0 m F.P: 0.904 kg/t CO: 1100kg P80: 2.953’’ Top size: 12.047’’ % finos (%-1’’): 47.3% AxB: 29.5
Proyecto: 2-02-3705-192 2-02-3705-189 Material: MINERAL Roca: STW SED Malla: 5.2 x 6.0 m F.P: 0.904 kg/t CO: 1100 Kg P80: 3.819’’ Top size: 19.921’’ % finos (%-1’’): 42.4% AxB: 28	Proyecto: 2-02-3735-173 Material: Mineral Roca: DIO Malla: 5.2 x 6.0 m F.P: 0.904 kg/t CO: 1100 kg P80: 2.992’’ Top size: 12.126’’ % finos (%-1’’): 47.2% AxB: 27.00
Proyecto: 2-02-3675-158 Material: MINERAL Roca: DIO Malla: 7.7 x 8.8m F.P: 0.641 kg/t CO: 1050 Kg P80: 2.283’’ Top size: 13.976’’ % finos (%-1’’): 52.9% Axb: >= 40	

Fuente: Extraído de Reportes de fragmentación de Palas 2051-2164.

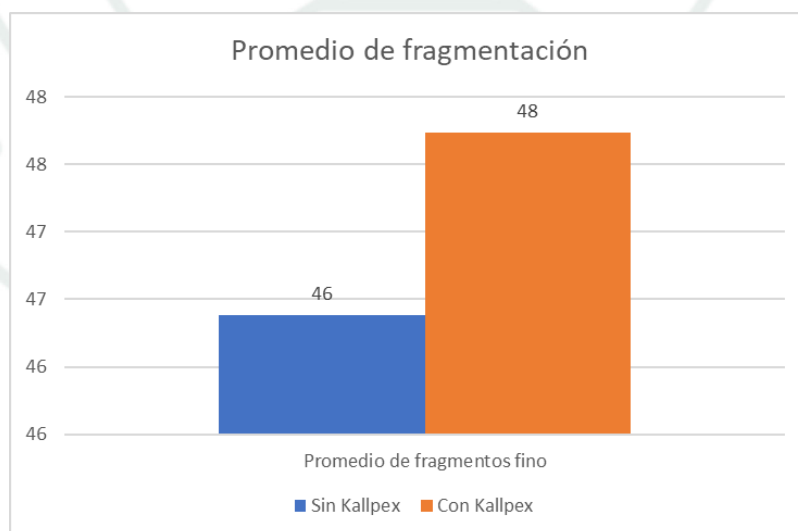
Como podemos observar estos elementos denotan ciertos cambios, los cuales podrían afectar -o no- la eficiencia del Kallpex, sería idóneo señalar cuáles podrían ser estas causas

(tipo de roca, mezcla, tiempo de almacenaje, nivel de viscosidad, etc.). La evidencia nos muestra que el porcentaje de mineral fragmentado fino superó el 50% bajo las siguientes condiciones:

- Material: Mineral
- Tipo de Roca: Diorita
- Malla: 7.7 x 8.0m
- F.P: 0.641 kg/t
- CO: 1050 kg
- P80: 2.283”
- Top size: 13.976”

En comparación con los otros informes de voladuras, la parte resaltante es la dimensión de la malla de perforación, el promedio utilizado fue de 5.0 x 6.0 m, mientras que en este caso, la dimensión ascendió a 7.7 x 8.0m, es decir una mayor área de detonación. Así mismo conforme a los informes del año 2025, precisamente en este procedimiento de voladura se utilizó material explosivo compuesto por Kallpex al 10%. Ahora bien, la interrelación de estos factores podrá ser revisado con mejor progresividad mediante una visión hasta antes del mes de junio de 2025.

Figura 2 Promedio de fragmentación



Fuente: Elaboración propia

La denominación sin Kallpex cuenta todos aquellos procesos de voladora previos al 1/06/2025, en tanto, se contabiliza según los datos proporcionados por la mina Antapaccay, que antes de su aplicación aditivo, entablado en estos casos únicamente el Vertex, un promedio de 46% de fragmentación menor a 1 pulgada; mientras posterior a la fecha señalada el promedio porcentual ascendió en dos 2%.

Otro dato de suma relevancia es el promedio de vibración, el cual tuvo un gran cambio con el posterior uso del Kallpex.

Figura 3 Promedio de vibración



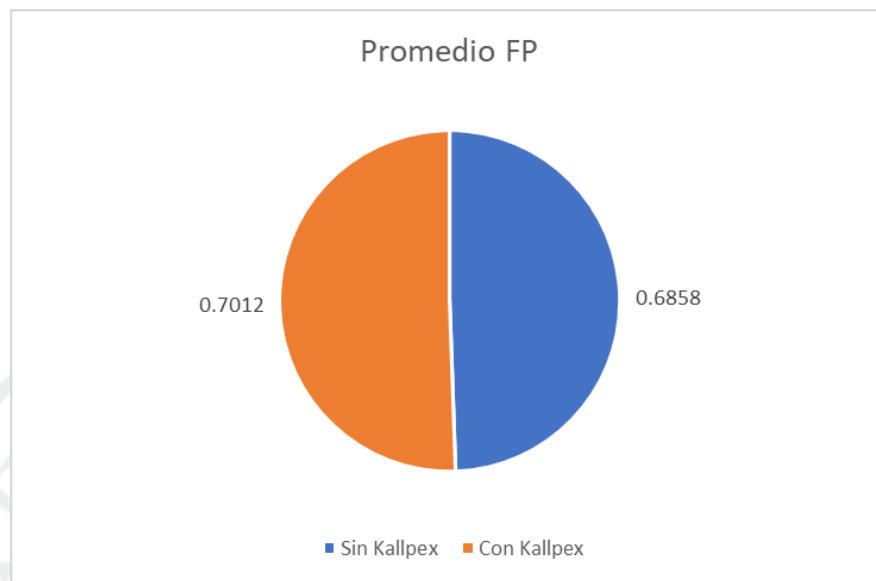
Fuente: Elaboración propia

Conforme a los datos, el promedio de la velocidad máxima de partícula (PPV), ascendió hasta el pico de 17 mm/s con el uso de Kallpex. No obstante, debemos tener en cuenta lo siguiente: para yacimientos mineros, conforme a normativa DIN 4150¹, precisa que para trabajos de voladura industriales o mineras, el marco aceptable está entre los 20 mm/s y 50 mm/s y, por lo tanto, el factor Kallpex al 10%, máximo porcentaje utilizado para la mezcla explosiva se encuentra dentro del estándar internacional.

Finalmente, para afianzar los resultados positivos sobre el uso de Kallpex en las mezclas explosivas es de tino traer a colación las evidencias respecto del factor de potencia, el cuál puede entenderse como el indicador respecto de la eficiencia energética de la voladura; valores altos pueden indicar sobrecarga, valores bajos subcarga.

¹ De origen alemán pero de utilización frecuente para la minería en el Perú.

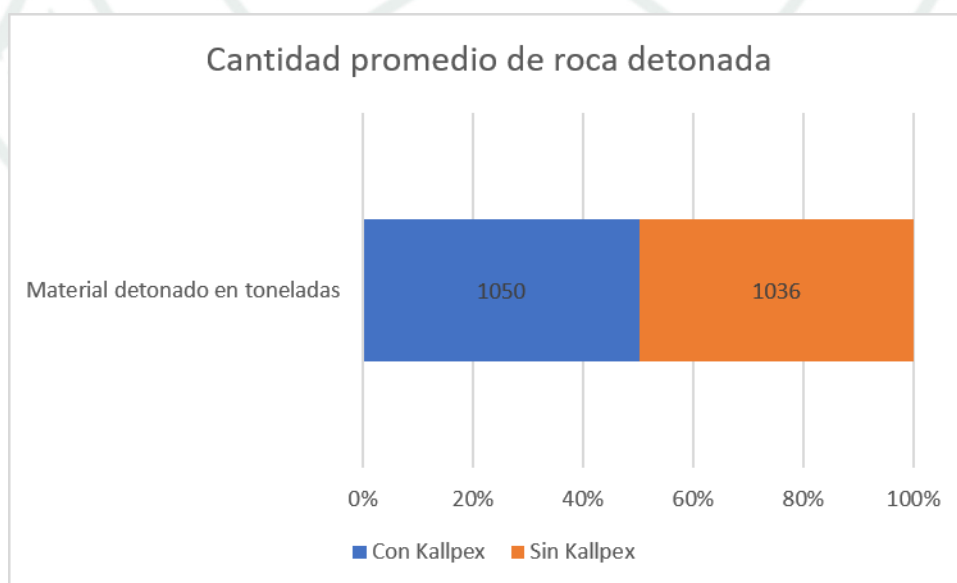
Figura 4 Promedio FP



Fuente: Elaboración propia

Los datos recogidos demuestran que aún con el uso del Kallpex, los promedios del factor de potencia son alterados mínimamente, esto quiere decir, utilizar cantidades similares de explosivos, sin abarrotar una compra excesiva del material produce, en términos sencillos, una mayor practicidad con alteración mínima respecto de las proporciones necesarias para cada voladura. Ahora bien, acompañando a este resultado tenemos que la cantidad de roca detonada, expresada en toneladas no difiere sustancialmente.

Figura 5 Cantidad promedio de roca detonada



Fuente: Elaboración propia

Entonces, es evidente que en situaciones prácticas, los resultados con el uso de Kallpex son más eficientes a los resultados cuando se utilizan aditivos distintos como el Vertex, generando un impacto de similar naturaleza pero con mejor aprovechamiento de la explosión, mayor fragmentación de la roca y mejor relación de cantidad de material explosivo empleado.

Objetivo específico 2 Diseñar un proceso para utilizar Kallpex desde su obtención, almacenamiento y utilización responsable.

Otro aspecto para tomar en cuenta es el documento “FT Kallpex”, en la cual se detallan las especificaciones técnicas, los riesgos de uso, almacenamiento y las precauciones necesarias. Es ideal que cada uno de estos elementos tengan un párrafo independiente. Del mismo modo, hacer referencia el documento “FDS Kallpex”, estrictamente en los puntos “2 identificación del peligro o peligros”, “7 Manipulación y almacenamiento”, “8 Controles de exposición y protección personal”, “13 eliminación de residuos”, “16 otra información (parte final, recomendación de Cachimayo)”.

Figura 6 FDS Kallpex

Presentación a granel, se transporta en unidades especialmente acondicionadas para este fin, almacenados en contenedores isotermos en las unidades mineras.

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Aspecto	Aditivo energético
Color	Gris
Solubilidad en agua	Insoluble en agua
Densidad	1.40 - 1.70 Kg/L
Viscosidad *	15000 cP a 35000 cP
Tiempo de vida útil **	30 días

* Viscosidad medida con viscosímetro Brookfield, spindle 7 (T-E), a 20 rpm y entre 20-25°C.
** En condiciones normales de almacenamiento (temperatura fluctúa entre 0 y 25°C).

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

KALLPEX es un aditivo que contiene en suspensión sólidos de aluminio, cuya función principal es incrementar la energía a las mezclas explosivas usadas en Minería a tajo abierto con aplicación en roca de mayor dureza.

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Comburente	NFPA	Nº UN
------------	------	-------

USOS

Se usa como aditivo que incrementa energía, a las mezclas explosivas como emulsiones y ANFOs pesados vaciables y bombeables, este producto es especialmente recomendado para voladuras en minería de superficie desarrollado para roca dura, que además puede presentar agua.

ALMACENAMIENTO

- Almacenar en un ambiente seco, fresco, limpio y bien ventilado.
- Evitar la exposición del producto a la luz solar o fuentes de calor.
- Evitar cambios bruscos de temperatura.
- Evitar almacenar y/o mezclar con sustancias incompatibles: ácidos, oxidantes, peróxidos, cloratos, zinc, cobre y aleaciones.

PRECAUCIONES

Uso obligatorio de equipos de protección personal, guantes lentes de seguridad, no respirar los gases, en caso de contacto con los ojos y piel lavarse inmediatamente con abundante agua y acudir a un médico.

Nota: Extraído del documento FDS Kallpex, Minera Antapaccay (2025)

Para dar cumplimiento a nuestro objetivo específico núm.2 se enunció la elaboración de un proceso a través del cual pueda contemplarse las etapas de obtención, almacenamiento y utilización. Cabe destacar que por su naturaleza el Kallpex es una sustancia de alta viscosidad lo cual es producido por su elevado contenido de aluminio, es preciso indicar que hasta antes de su uso en la actividad minera, se utilizaba una mezcla explosiva sin aditivo lo cual era más

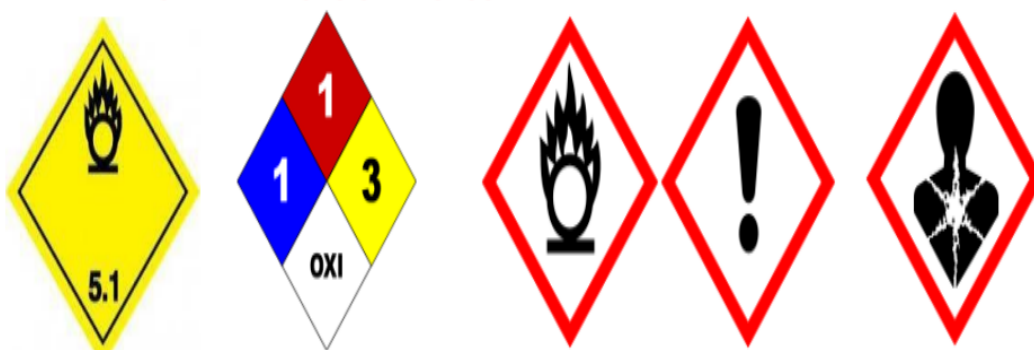
sencilla de manipular y almacenar (o merecía un tratamiento simplificado a comparación del Kallpex). El uso del Kallpex ha traído desafíos en la manipulación puesto que además de ser un producto nuevo, su utilización conlleva particularidades que son necesariamente advertibles.

Este aditivo es altamente energético, lo cual lo hace útil para romper compuestos macizos rocosos de alta dureza e independiente de su condición de los terrenos húmedos o secos cumple con su función de fragmentar la roca en tamaños adecuados para ser acarreados y procesados a nivel operativo.

Es necesario también mencionar un punto acerca de las medidas de seguridad antes de la manipulación del aditivo, puesto que es altamente peligroso al contacto directo con el cuerpo humano y en el medio ambiente, evitando consecuencias graves en el organismo. Los puntos centrales sobre las advertencias de fábrica son las siguientes.

Figura 7 Identificación de los peligros

2 IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO O PELIGROS



Nota: Extraído de la ficha de datos de seguridad elaborado por la Minera Antapaccay

El primero de los símbolos señala el riesgo de material comburente, es decir, es un producto que genera oxígeno y podría alimentar la combustión de material inflamables. El rombo NFPA indica rangos leves de inflamabilidad, justamente porque propiamente no es un combustible sino un aditivo aluminico, un riesgo leve de daño a la salud personal, aunque aquello no suponga su manipulación con la debida prevención y dada su naturaleza aluminica, tiene una probabilidad moderada de reacción explosiva; finalmente, agrega su tipología de oxidante. Por último, los tres pictogramas señalan el riesgo de material comburente, químico y de riesgo para la salud.

Una tomado en cuenta, teóricamente los riesgos por el uso de Kallpex, tenemos que las recomendaciones son las siguientes:

Tabla 4 Cuadro de precauciones Kallpex

Código	Precaución
H272	Puede agravar un incendio; comburente.
H319	Provoca irritación ocular grave
H316	Provoca una leve irritación cutánea.
H350	Puede provocar cáncer.
H373	Puede provocar daño hematológico, timo e hígado tras exposiciones prolongadas o repetidas.
H412	Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Nota: Datos extraídos de la ficha de seguridad elaborado por la Minera Antapaccay

Estos aspectos permitirán a nuestro proceso centrar el número adecuado de acciones necesarias para proteger de todos los riesgos características del uso de Kallpex. Como es observable, los riesgos a la salud podrían afectar la vista, daños dermatológicos, a órganos como el hígado, la sangre, sistema inmune e incluso causa el cáncer, todo esto último en caso una prolongada exposición.

Figura 8 Componentes del Kallpex

Componentes	Denominación química	Concentración	Número CAS	Número NU
Nitrato de amonio		menor a 32%	6484-52-2	1942
Agua		mayor a 50%		
petróleo		menor a 9%	68476-30-2	1202
Aluminio grado I		mayor a 30%	7429-90-5	1309

Nota: Extraído de la ficha de datos de seguridad elaborado por la Minera Antapaccay

Estos componentes revelan que tres de los componentes del Kallpex contienen partículas de oxígeno dentro de su composición química: nitrato de amonio (NH_4NO_3), agua (H_2O) y el aluminio en grado I, aunque sobre este último hay que recalcar que su naturaleza oxidante convierte a este componente en Al_2O_3 . Todo ello coincide con los datos anotados en los pictogramas y símbolos de precaución.

Con todo lo precisado, conforme a la ficha de datos de seguridad, debe tomarse en cuenta la siguiente ruta de manipulación y almacenamiento:

- Debe situarse en un lugar ventilado y lejos de agentes incandescentes o inflamables, del mismo modo, se encuentra prohibido mientras se utilice, almacene o traslade el consumo de cigarrillos.
- A efecto de evitar contacto prolongado con el material el mismo se debe colocar lejos de las zonas comunes o de consumo del personal minero, del mismo modo, la ventilación debe ser adecuada y constante.
- Está prohibido someter el material a la estimulación con agentes reductores fuertes, ácidos y bases fuertes, materia orgánica, cromatos, zinc, aleaciones de cobre y metales en polvo.
- Respecto del área de almacenamiento, esta debe cumplir con un estándar alto: limpio, seco y ventilado.
- Mantener alejado de agentes reductores fuertes, ácidos y bases fuertes, materia orgánica, cromatos, zinc, aleaciones de cobre y metales en polvo.
- La forma de trasiego se realiza mediante el empleo de Camiones cisterna, cubitanque o silos.

Finalmente, el procedimiento de manipulación debe tomar en cuenta su estabilidad y reactividad.

Figura 9 Datos sobre estabilidad y reactividad

10.1.	Estabilidad química	Estable almacenado en condiciones normales de presión y temperatura.
10.2.	Reacciones peligrosas	No polimeriza.
10.3.	Condiciones que se deben evitar	No almacenar cerca de fuentes de calor, chispa o fuego.
10.4.	Materiales/sustancias incompatibles	Ácidos o bases fuertes, oxidantes, peróxidos, cloratos, cobre y sus aleaciones, zinc.
10.5.	Productos peligrosos de la descomposición	Óxidos de nitrógeno

Nota: Extraído de la ficha de datos de seguridad elaborado por la Minera Antapaccay

La información indica una serie de anotaciones recogidas también en un pequeño informe sobre su obtención, es decir, abastecimiento, este documento fue realizado por la mina Antapaccay.

Figura 10 Traslado de Kallpex



Nota: Extraído del Informe de desviaciones operativas en el trasegado en la mina Antapaccay - Kallpex, Julio 2025. ENAEX.

Como es observable del reporte, los tanques cisterna que son utilizados para el traslado y trasegado del Kallpex presentan notorias diferencias de viscosidad, temperatura y densidad con respecto al material encontrado en la parte superior e inferior del tanque; este problema genera un problema en el vaciado del material en tanto crea obstrucciones.

Figura 11 Trasegado de Kallpex



Nota: Extraído del Informe de desviaciones operativas en el trasegado en la mina Antapaccay - Kallpex, Julio 2025. ENAEX.

Estas imágenes captadas evidencian mejor el problema obstructivo del Kallpex, esto genera desperdicio del material, defectos en las máquinas de bomba de descarga y cilindros de almacenaje y transporte. Estos resultados indican que, con el transcurso del tiempo, el producto pierde su homogeneidad inicial, manifestando una sedimentación significativa lo que ocasiona un atascamiento al momento del trasegado.

Para crear un proceso uniforme y con visión en la mínima pérdida de materiales y malgaste de bienes de alta cuantía como camiones, bombas, cisternas y tanques especiales; nuestro proceso contempla lo siguientes aspectos:

- a) Empleo de un sistema de transporte especializado en productos de alta viscosidad tales como camiones tipo Milodón.
- b) Hoja de ruta que defina el estadio del material previo a su salida de la fábrica de producción, el mismo que incluirá los parámetros de viscosidad, estabilidad y examen de homogeneidad.
- c) Realización del trasegado bajo a efecto de la prevención de obstrucciones.
- d) Luego de la descarga, emplear un depurado de los cilindros o tanques de almacenaje a efecto de prevenir la acumulación de residuos aluminicos altamente reactivos.
- e) Soplado de aire de mangueras y tuberías angostas.

f) Solicitar la presencia del personal de la empresa fabricante del Kallpex a efectos de validación sobre la integridad del producto.

Todos estos puntos anotados, convienen en un proceso de mayor aprovechamiento del Kallpex como aditivo. La visión es la de tomarlo como un material riesgo por su reactividad, utilizando personal capacitado para su manipulación, evaluación sobre su mezcla probada (hasta el momento no máximo del 10%), cautela sobre su transporte, trasegado y almacenaje.

Como parte final de la utilización de Kallpex, comprende hablar sobre la eliminación de los productos. En este apartado comprende la clasificación de los residuos y la correcta disposición y segregación a través de alguna empresa operadora de residuos sólidos (EO-RS) autorizada por el MINAM con respecto a la ley de gestión integral de residuos sólidos, donde indica que deben ser segregados como residuos peligrosos.

Es importante también desechar los elementos con el que se realizó el barrido del material, en caso de derrames el procedimiento adecuado es echarle tierra* y colocarlo en una bolsa junto con el escombros y los paños absorbentes utilizados.

Atendidos los puntos sobre informes, conviene destacar que la fórmula procedimental para el empleo eficiente y seguro del Kallpex cumple con la siguiente hoja de ruta:

1. Obtención – información planta Cachimayo

1.1. Almacenamiento

El almacenamiento de este material es preciso ya que se debe mantener en áreas seguras; limpias, secas y ventiladas, fuera del alcance de fuentes de calor, chispas y llamas, y materiales hidrocarburos, ni sustancias combustibles como los ácidos, oxidantes, peróxidos, cloratos, cobre o zinc. Es necesario almacenar en envases adecuados (camiones cisterna, cubitanques o silos) y evitar mezclar con matrices de distinta formulación.

1.2. Transporte

Respecto al transporte del Kallpex está permitido tanto vía terrestre como marítima, excepto vía aérea, sabiendo esto el transporte terrestre se realiza cumpliendo estrictamente el reglamento nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligroso, el D.S. N°021-2008 MTC, siendo clasificado como peligro ambiental puesto que es tóxico para organismos terrestres y acuáticos con efectos nocivos duraderos; referente a la designación oficial de transporte de las naciones unidas se está considerando como emulsión de nitrato de amonio y clasificación de peligro primario UN 5.1 que señala a aquellas sustancias

comburentes cumpliendo con el grupo III de embalaje, estas clasificaciones es necesarios que se vayan informando gráficamente con los pictogramas correspondientes durante todo el traslado del material en sus respectivas ubicaciones/áreas.

2. Manipulación

2.1. Controles de exposición y protección personal

En primer lugar, es importante conocer todas las precauciones de seguridad que se deben agregar en cada proceso donde involucre la manipulación del aditivo Kallpex, estar debidamente capacitados en teoría y práctica de la utilización del aditivo. Evitar el contacto directo con el aditivo, mediante el uso correcto de equipos de protección personal, es preciso realizar una adecuada limpieza del área antes y después donde fue manipulado y así mismo un correcto lavado de manos y cara para eliminar los residuos contaminantes.

Trabajar en áreas bien ventiladas y prohibir el consumo de alimentos o bebidas en zonas de manipulación y utilización. Es importante recalcar el uso de procedimientos adecuados para conocer las propiedades físicas y químicas del material y conocer exactamente como debe ser tratado en laboratorios, planta y netamente en campo (operaciones mineras). También es recomendable implementar medidas operacionales para reducir la exposición (extracción localizada, procedimientos seguros de carga/descarga).

3. Utilización

3.1. Usos

a) Previo a la utilización del aditivo Kallpex, procurar la debida capacitación sobre las instrucciones del Kallpex.

b) El aditivo Kallpex es utilizado en minería tajo abierto debido a su alto poder energético y en roca de alta dureza. Con respecto al proceso de utilización se comprende desde que llega a la unidad minera hasta su uso final en los proyectos de voladura.

c) Para realizar el carguío de taladros de voladura, el aditivo Kallpex permite que se realice mediante el sistema vaciable en caso de ser terrenos secos, sin presencia de agua y así mismo es posible utilizarlo en terrenos húmedos, con presencia de agua mediante el sistema bombeable de los camiones fábrica; sin observar ningún desvío en el proceso de utilización y obtención de buenos resultados (fragmentación, vibración, densidad, etc.).

3.2. Operación y Mantenimiento

A nivel operativo el aditivo Kallpex presenta alta viscosidad y densidad es por esto que al ser usado por personal y sistemas se presentan diversas complicaciones y por ende retrasos en el proceso de manipulación y utilización, los principales obstáculos que se observaron en el abastecimiento a camión fábrica, fue por el tipo de presentación en contenedores de 1000L con un caudal de salida bajo lo que generaba demoras operativas; por ende se optó por mandar en cisternas de 30 toneladas y el almacenamiento sería al igual que una emulsión, en silos de 70ton sin embargo se seguían generando inconvenientes en el trasegado desde la cisterna al silo, esto conllevó a desgaste de bombas, maquinarias, sobre esfuerzo del personal, y demoras operativas.

En cuanto a su mantenimiento, se realizaron cambios en los camiones fábrica en el sistema de descarga donde refiere a la implementación de mangueras de petróleo para la lubricación de la bomba de Kallpex y así evitar mayor desgaste en los componentes de los camiones fábrica.

4. Indicaciones generales/complementarias

4.1. Identificación de peligros

En cuanto a los peligros que se tiene con el Kallpex desde su obtención hasta su utilización, podemos tener en cuenta que pertenece a una clasificación como comburente, propenso a agravar un incendio, también es posible identificar que durante su incorrecta manipulación y/o uso inadecuado de los equipos de protección personal podrían ocurrir irritaciones a nivel ocular grave, también se puede presentar irritación cutánea leve mediante salpicaduras; es por esto que es obligatorio el correcto almacenamiento y manipulación de esta sustancia peligrosa y tener una correcta limpieza después de su manipulación, una adecuada segregación de los residuos peligrosos.

Se añade, además, tener la precaución sobre el consumo de alimentos o bebidas cerca del área donde se esté manipulando la sustancia peligrosa, así evitando la ingesta y consecuencias dañinas para la salud.

4.2. Especificaciones técnicas

El aditivo energético Kallpex es la mezcla de varios componentes dentro de ellos está el aluminio lo que le da un aspecto de color grisáceo y la alta viscosidad variando de 15000cP a 35000cP y presenta densidades altas oscilando de 1.4 a 1.7 g/cm³ dependiendo del porcentaje

y granulometría del aluminio; la vida útil del aditivo son 30 días para utilizarlo y obtener los resultados esperados.

4.3. Administración del personal

Este aspecto evalúa si la implementación del Kallpex afecta roles, responsabilidades, KPI's, organigrama, procesos de RRHH o turnos. No se notaron cambios en la estructura organizativa ni en la gestión del personal. Sin embargo, se recomienda verificar que las responsabilidades relacionadas con la manipulación y abastecimiento de Kallpex estén claramente definidas para evitar vacíos operativos.

Así también recordar el control de calidad que se debe realizar al material peligroso respecto al control de su viscosidad, control de densidades cada vez que llegue este material a la unidad minera, así también se hacen pruebas con los demás componentes de la mezcla explosiva con la que se realiza el carguío de taladros y observar su correcta reacción; todos estos controles son elaborados por un personal en un laboratorio con todas las condiciones adecuadas para su manipulación.

4.4. Recursos

Este aspecto revisa la necesidad de recursos físicos, humanos, insumos, herramientas, áreas de trabajo y financieros. Al inicio se concluyó que no se necesitaban requerimientos adicionales. No obstante, por la naturaleza del cambio, se recomendó confirmar la disponibilidad de insumos y equipos para el abastecimiento seguro de Kallpex, así como la compatibilidad con el camión fábrica. Sin embargo, hubo una modificación con el camión fábrica en el sistema de carguío, donde se instaló una manguera para la inyección de petróleo, esto para realizar una limpieza del aditivo y prevenir taponamientos en el proceso de carguío.

4.5. Salud y seguridad/primeros auxilios

Es el aspecto más crítico, con varios impactos aplicables. Se identificaron riesgos para los trabajadores por la manipulación de Kallpex, fallas en el proceso de voladura y afectación por materiales peligrosos. Las medidas incluyen capacitación, actualización del IPERC Base, modificación del PETS y difusión de la MSDS. Aunque la mayoría de los riesgos se reducen de no rutinarios (NR) 13 a no rutinarios (NR) 6, en el caso de materiales peligrosos el NR final quedó mayor (16), lo que requiere revisión y controles adicionales como EPP's específicos y protocolos de almacenamiento.

4.6. Medio Ambiente

En el aspecto de medio ambiente, hay subaspectos que se tienen en cuenta como los planes, los recursos hídricos que se usarán netamente en el proceso de fabricación, si bien es cierto no se predicen impactos ambientales directos, es necesario revisar la compatibilidad con el EIA vigente y establecer procedimientos adecuados para un plan de emergencia en caso de derrames y saber cómo disponer los residuos, ya que el Kallpex es un material peligroso y debe ser desechado como material peligroso.

4.7. Relaciones comunitarias

Este aspecto no impacta directamente el material a las relaciones comunitarias, es decir que la implementación del aditivo no afecta la interacción con comunidades. Si el transporte o almacenamiento ocurre cerca de zonas pobladas, se recomienda incluir un plan de comunicación preventiva para evitar percepciones de riesgo. Es importante mencionar que durante estos procesos tanto de almacenamiento como el transporte se debe utilizar medios de comunicación como las señaléticas en el caso de transporte los pictogramas (rombo NFPA, del ADR, del SGA, entre otros).

En síntesis, el aditivo Kallpex, una solución acuosa de color grisáceo, con contenido de aluminio granulado, altamente viscoso y densidades entre 1.4 a 1.7 gr/cm³; durante todo su proceso cumple con ciertas instrucciones respecto a la correcta manipulación, transporte, almacenamiento y utilización ya que es un comburente propenso a agravar incendios, las medidas de seguridad son explícitas en el correcto uso de equipos de protección personal resaltando los efectos graves en la salud.

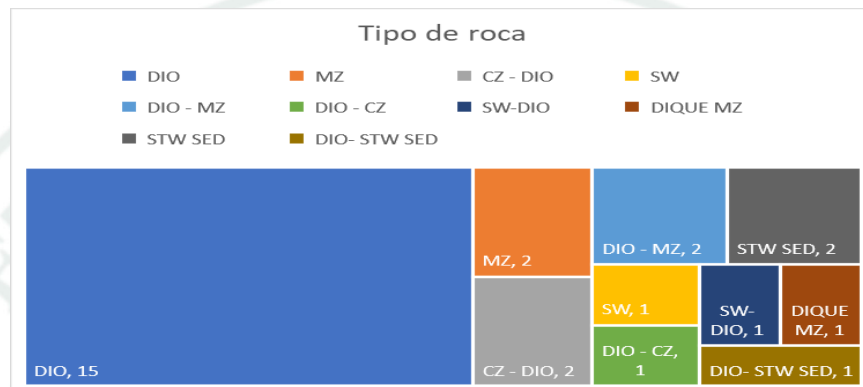
También se considera una adecuada segregación de los residuos y saber cómo cumplir con las normas vigentes del país siendo considerado un material peligroso así evitando contaminación en el medio ambiente, el almacenamiento de este material peligroso es en lugares ventilados dentro de contenedores cerrados y secos lejos de materiales combustibles, hidrocarburos o agentes reductores como los ácidos, cromatos, metales en polvo, etc.

Así mismo en la parte operativa hubo cambios en las condiciones del camión fábrica y almacenamiento para disminuir los retrasos en tiempos de carguío o abastecimiento, puesto que se generaban atrasos por los atoramientos del aditivo en las maquinarias utilizadas.

Objetivo específico 3 Realizar una evaluación de los resultados de la voladura realizada con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex en la empresa minera Antapaccay.

De las detonaciones realizadas por la mina Antapaccay, en el año 2025, escogidas un número total de 30 eventos, hemos recolectado los siguientes datos:

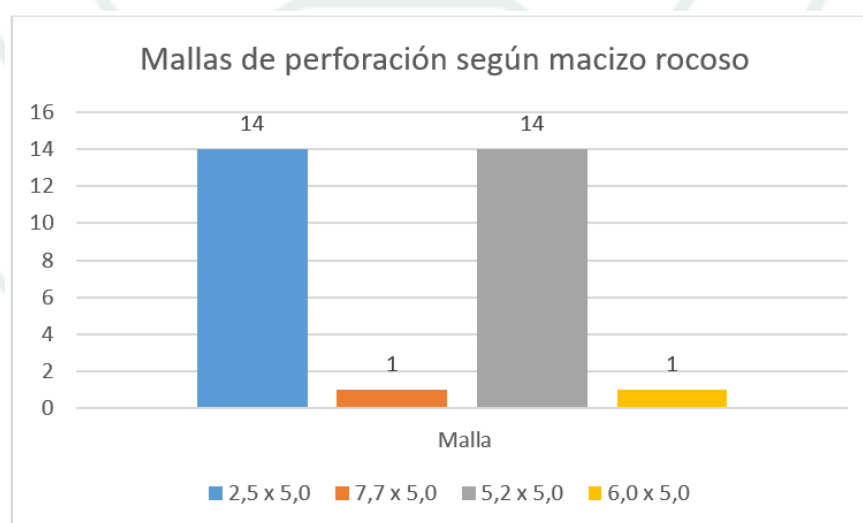
Figura 12 Tipos de rocas



Fuente: Elaboración propia

El tipo de roca de mayor recurrencia en el yacimiento minero es la diorita, seguidas por otras como sedimentarias entre otras, siendo que, en quince de las 30 detonaciones, es decir la mitad de los casos, fue esta roca la explotada mediante el uso de mezclas explosivas con Vertex, HA73G y Kallpex. Ahora bien, para el aprovechamiento correcto y eficiente de los minerales asentados en estas rocas se utilizaron mallas de perforación de diferentes tamaños.

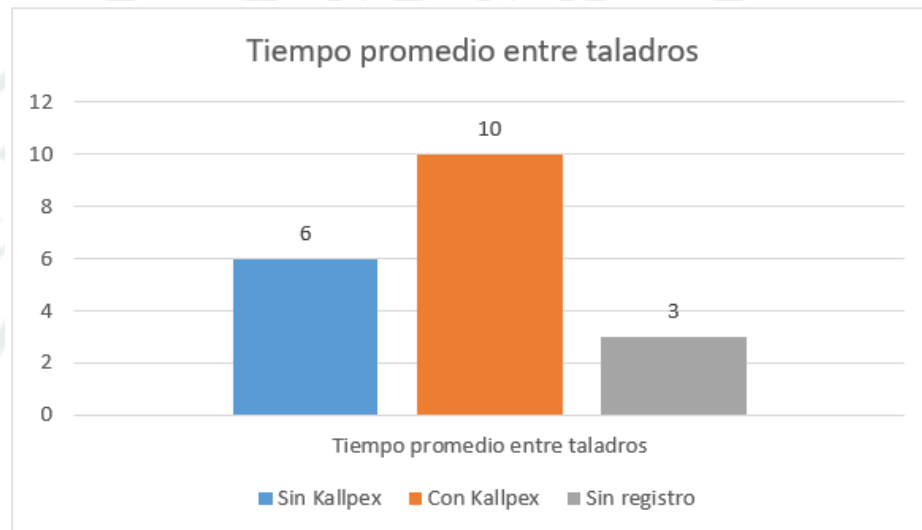
Figura 13 Mallas de perforación según macizo rocoso



Fuente: Elaboración propia

Las mallas de mayor recurrencia fueron del tamaño promedio de 2,5 x 5,0 y 5,2 x 5,0. No obstante, hay que tomar en cuenta que el tamaño de malla de perforación con mejor resultado fue la de 7,7 x 5,0. Relacionado con este dato, tenemos que el porcentaje de fragmentación fino menor a 1 pulgada de tamaño fue la registrada con una malla de 5,2 x 5,0, con el uso de Kallpex y en roca diorita.

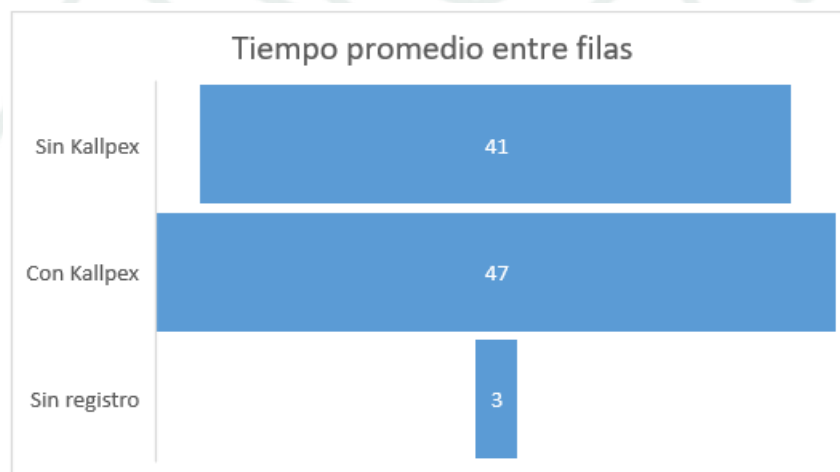
Figura 14 Tiempo promedio entre taladros



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, respecto del tiempo de taladros, la información apunta que hay un mejor registro con las detonaciones realizadas con el uso de Kallpex, en el sentido que existe un mejor control y mayor tiempo en cada uno de ellos, lo cual permite definir mejores parámetros de las explosiones y espacio para la fragmentación independiente de cada uno de los taladros.

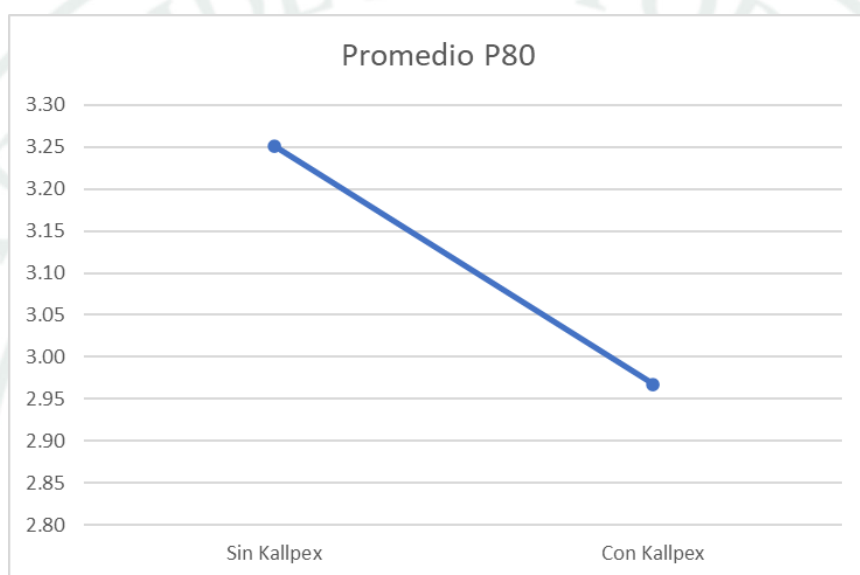
Figura 15 Tiempo promedio entre filas



Fuente: Elaboración propia

En un sentido bastante similar al anterior, los tiempos entre filas también fueron adecuados en el caso del uso del Kallpex difiriendo con el tiempo utilizado con otros explosivos como el Vertex, promediamente, en 6 segundos. Esto asegura un mayor espectro de prevención y aseguramiento de las guías explosivas, con una comunicación entre ellas razonable para la detonación controlada de roca.

Figura 16 Promedio de P80



Nota: Elaboración propia

Sobre el P80 (tamaño de partícula (en pulgadas o mm) por debajo del cual pasa el 80% del material fragmentado), tenemos que la granulación de roca fue de mejor calidad cuando se utilizó el Kallpex, en tanto, el tamaño de menor envergadura, y por lo tanto, mejor aprovechable para su separación del mineral que es el producto deseado.

Objetivo general: *Implementar el Kallpex en la mezcla explosiva en el proceso de voladura de la empresa minera Antapaccay, 2025.*

La implementación del aditivo aluminizado Kallpex en las mezclas explosivas para voladura en la mina Antapaccay durante 2025 demostró resultados técnicamente favorables, aunque con desafíos operativos significativos. En el aspecto técnico, el uso de Kallpex al 10% incrementó en 2% el promedio de fragmentación fina (menor a 1 pulgada) respecto a explosivos convencionales, alcanzando picos de 48% en roca diorita con mallas de 5.2 x 5.0 m.

El P80 se redujo notablemente, indicando una fragmentación de mejor calidad para el procesamiento posterior. Las velocidades de partícula (PPV) se mantuvieron dentro del estándar internacional DIN 4150 (máximo 17 mm/s), y el factor de potencia se mantuvo estable, demostrando eficiencia energética sin sobreconsumo.

Respecto de las vibraciones es conveniente denotar que la relación de fragmentación fina también se encuentra relacionado con dicho factor. Para resumir, los registros confirman la potencia explosiva del Kallpex que llega a doblar los niveles vibratorios, este aumento implica una serie de toma de decisiones por parte de la empresa minera en función a la adaptación del proceso de voladura a criterios de mayor vibración, impacto explosivo y nivel de fragmentación.

De otro lado, la implementación enfrentó retos en la logística operativa. El Kallpex presentó problemas de sedimentación y alta viscosidad (15,000 a 35,000 cp) durante el transporte y trasegado, generando obstrucciones en bombas, desgaste de equipos y demoras operativas. Estos inconvenientes exhiben la necesidad de modificar el proceso de trasegado, se considera necesario la implementación de sistemas de bombeo especializados y protocolos estrictos de almacenamiento en condiciones controladas.

En conjunto, la implementación demostró que, pese a las dificultades iniciales, el aditivo mejora la calidad de fragmentación y mantiene la eficiencia operativa cuando se gestionan adecuadamente sus particularidades físicas y de manipulación.

Del mismo modo, no debemos dejar de pasar por desapercibidos las conclusiones presentes en el informe Enaex sobre los problemas detectados en el trasegado de material Kallpex. Uno de los mayores retos de la implementación es la decantación producida en el transporte del producto desde el lugar de fabricación hasta el yacimiento minero. Otro aspecto a resaltar es la pérdida de homogeneidad y estabilidad del producto, lo cual es un indicador difícil que debe ser atendido por un procedimiento especial para la utilización del aditivo.

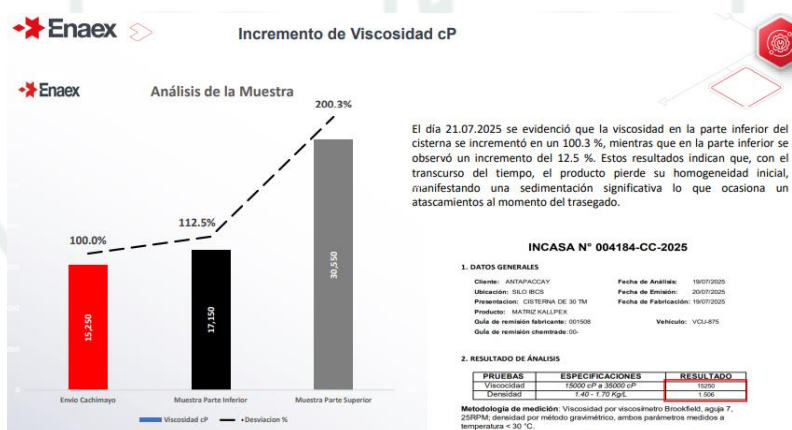
Figura 17 Conclusiones del informe Enaex



Fuente: Extraído del Informe de desviaciones operativas en el trasegado en la mina Antapaccay - Kallpex, Julio 2025. ENAEX.

Para terminar los aspectos relativos a la viscosidad del producto también son un punto clave. Conforme al informe de Enaex, la viscosidad aumenta gradualmente conforme al transcurso del tiempo, esto quiere decir que su utilización debe ser realizada de forma inmediata y con el menor retraso posible, siempre y cuando se mantenga el margen de seguridad operacional ya advertida en puntos anteriores a este.

Figura 18 Viscosidad



Fuente: Extraído del Informe de desviaciones operativas en el trasegado en la mina Antapaccay - Kallpex, Julio 2025. ENAEX.

La línea diferencial de viscosidad decanta que el punto de riesgo necesario a tratar sería aquella parte del material que fue transportada ubicada en la zona superior del tanque, pues la diferencia entre la viscosidad promedio anotada en la planta de producción todavía mantiene márgenes aceptables en lo relativo al material depositado en la parte inferior del tanque, situación distinta a la ubicada en la primera zona anotada; por lo tanto, conviene proponer una

fórmula de mejora en la mantención del nivel de viscosidad tanto en la parte superior como inferior del tanque.

El criterio de pertinencia tanto desde el transporte hasta el recojo de material fragmentado supone una evaluación en integridad del uso del aditivo aluminizado. Los resultados, aparte de los beneficios, también han demostrado los aspectos adyacentes al aumento de potencia explosiva, aunque, a la luz de los resultados, el nivel de fragmentación sino con la energía expulsada producto de la explosión.

Tabla 5 Impacto cuantitativo de las desviaciones operativas del Kallpex

Indicador cuantitativo	Valor registrado	Periodo / Muestra
Incremento de viscosidad post-transporte (parte superior del tanque)	+100,3% respecto al valor de envío	Muestreo en 6 cisternas
Eventos de obstrucción en bombas / líneas de descarga	12 eventos	Durante 30 operaciones de trasegado
Tiempo promedio de trasegado por cisterna (Kallpex)	4,5 horas	n=12 cisternas
Retraso operativo acumulado por obstrucciones	18,5 horas	Julio – Setiembre 2025
Horas hombre adicionales por limpieza de líneas y bombas	36 horas-hombre	Personal de planta y mantenimiento
Desgaste prematuro de bombas (cambio de componentes)	2 bombas reparadas / 1 bomba reemplazada	En 3 meses de uso

Fuente: Elaboración propia

Sobre el elemento particular de la viscosidad post-transporte, con enfoque en la parte superior de los tanques, el valor incrementado supera la capacidad de bombeo. Esta alteración se encuentra directamente vinculada con la obstrucción de las mangueras y bombas. En condiciones normales, el trasegado de una emulsión convencional (Vertex) toma

aproximadamente 1,8 horas. Con Kallpex, el tiempo aumentó **2,5 veces** debido a la necesidad de realizar purgas periódicas con aire, ajustar caudales de bombeo y desobstruir tuberías. Esto representa una pérdida de productividad de 2,7 horas por cada cisterna recibida. Realizando una acumulación del tiempo Este último.

Tomando en cuenta que se tuvo en cuenta para la observación un total de 12 cisternas, el promedio de trasegado por cisterna ascendió a un 2,5 a diferencia del trasegado de otros compuestos como el vertex, el cual tiene un promedio de 1,8 horas. Esto se debe a que se debe de realizar purgas periódicas a los tanques de transporte de Kallpex, lo cual representa una pérdida en la productividad del aditivo. Este retraso equivale a más de dos turnos completos de trabajo (asumiendo turnos de 8 horas). Durante ese tiempo, los equipos de perforación y carga permanecieron a la espera del abastecimiento de explosivo, generando un impacto directo en el cumplimiento del programa semanal de voladuras. El costo asociado (mano de obra, equipos ociosos, penalizaciones por retraso) no fue cuantificado en el informe, pero se estima significativo.

Sobre el valor de horas por hombre adicional para el trasegado del Kallpex se tiene que este corresponde al tiempo extra dedicado exclusivamente a labores de limpieza mecánica y química de los equipos de bombeo, líneas de descarga y filtros. Este esfuerzo no estaba previsto en los procedimientos operativos estándar (POE) para emulsiones convencionales. Si se considera un equipo típico de 3 operarios por evento, las 36 horas-hombre representan 12 eventos de limpieza de aproximadamente 3 horas cada uno, lo que coincide con los 12 eventos de obstrucción reportados.

Todo lo reportado evidencia el valor de la temperatura en el transporte de material aluminizado. Por lo que, si en caso, la implementación de Kallpex requerirá una serie de cambios en los tanques de transporte para asegurar el íntegro de la masa aluminizada, para así evitar la elevación de su viscosidad, lo cual compondría una mejora en su trasegado y la protección de las válvulas de trasegado.

Respecto de la hipótesis de trabajo planteada se tiene que implementación del aditivo aluminizado Kallpex en las voladuras de la mina Antapaccay incrementó en un 2% el promedio de fragmentación fina (menor a 1 pulgada) respecto a explosivos convencionales, alcanzando picos del 48% en roca diorita con mallas de 5,2 x 5,0 m.

El tamaño de partícula P80 se redujo significativamente, lo que facilita las etapas posteriores de carguío y procesamiento. El factor de potencia se mantuvo estable en 0,64 kg/t,

evidenciando una mayor eficiencia energética sin sobreconsumo de explosivo. Las velocidades máximas de partícula (PPV) se mantuvieron por debajo de 20 mm/s, cumpliendo la norma DIN 4150 y garantizando la estabilidad de taludes.

Como se ha mencionado en el punto anterior, persisten desafíos operativos críticos durante el transporte y trasegado del Kallpex, ya que el producto presentó una decantación de aluminio que incrementó su viscosidad hasta en un 100,3% respecto al valor de envío, generando obstrucciones en bombas y líneas de descarga. Este fenómeno, documentado en el informe de desviaciones de Enaex, provocó interrupciones operativas y desgaste prematuro de equipos.

La evaluación de 30 eventos de voladura demostró que, pese a las dificultades logísticas, el Kallpex puede mejorar la calidad de fragmentación y mantener parámetros de seguridad aceptables. Los tiempos entre taladros y entre filas fueron más controlados, con un promedio de 6 segundos adicionales respecto al explosivo Vertex. La mayor potencia energética del aditivo permitió optimizar el diseño de mallas de perforación, reduciendo costos operativos a largo plazo. Por lo tanto, se han descifrado los beneficios de utilizar el Kallpex en voladura de superficie como aditivo reemplazante del Vertex para la creación de mezclas explosivas de Anfos transportables, depositables y para el bombeo inmediato.

Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en las mezclas explosivas para voladura en la mina Antapaccay generó mejoras significativas en la fragmentación de la roca, no obstante, se presentaron desafíos operativos relacionados con su trasegado, manipulación y logística. Estos hallazgos deben analizarse a la luz de investigaciones previas y literatura especializada en tecnología de explosivos.

En este sentido fue Hernández et al. (2014) sostienen que la interpretación de los resultados debe de ser realizados mediando un contraste sistemático junto a los antecedentes científicos, con el fin de poder determinar si los hallazgos confirman, amplían o si se descubre un nuevo matiz en la teoría científica. Con los resultados obtenidos no solo se representa una medición técnica aislada, sino una validación empírica de los principios fisicoquímicos que rigen el comportamiento de los explosivos aluminizados.

Preliminarmente es necesario realizar algunas precisiones conceptuales necesarias en la siguiente sección a efecto de que no se confundan los datos, ni tampoco los registros.

Tabla 6 Conceptos relativos a la voladura

Concepto	Significado	Relación con el aluminio
Energía total liberada	Capacidad de realizar trabajo (kJ/kg)	Aumenta con el aluminio (reacción secundaria)
Presión de detonación	Presión en el frente de onda (GPa)	Depende más de la densidad y VOD; el aluminio la afecta moderadamente
Temperatura de explosión	Calor alcanzado durante la reacción (°C)	Aumenta significativamente con aluminio
Presión de gases post-detonación	Presión sostenida tras la onda de choque	Principal beneficio del aluminio: prolonga el empuje
Fragmentación	Ruptura de la roca en tamaños menores	Resultado combinado de onda de choque + presión de gases

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, el incremento del 2% en la fragmentación fina (menor a 1 pulgada) y la reducción del P80 con el uso de Kallpex al 10% confirman lo señalado por Giraldo (2020), quien sostiene que las formulaciones con mayor porcentaje de aluminio resultan más favorables para la fragmentación en voladuras. El ANFO aluminizado mejora significativamente la calidad de la fragmentación en comparación con mezclas convencionales, lo cual coincide con nuestros hallazgos donde el explosivo mejorado produjo partículas de menor tamaño, facilitando las etapas posteriores de carguío y procesamiento.

En relación con la investigación, los tamaños de fragmentación fina, con Kallpex, ascendió en un 1.35% más a comparación con otras mezclas explosivas tales como el Vertex también producto de Enaex fabricado en la planta Cachimayo.

Desde un punto de vista químico, Diaz (2023) explica que la incorporación de aluminio metálico va a incrementar la energía total a liberarse durante la reacción exotérmica secundaria por oxidación del aluminio posterior a la detonación primaria, incrementando la temperatura de los gases de explosión y se prolongaría la presión afectiva sobre el macizo rocoso. Dicho fenómeno explicaría el desplazamiento de la curva granulométrica hacia tamaños más finos contemplados en el gráfico de resultados

Asimismo, estos resultados guardan relación con el trabajo de León (2021), quien demostró que la mezcla explosiva Quantex 73, también aluminizada, optimizaba la voladura primaria en el tajo Toromocho reduciendo el tamaño de los fragmentos. Nuestra investigación complementa estos hallazgos al evidenciar que el Kallpex, con una concentración de aluminio superior al 20%, produce efectos similares en términos de fragmentación controlada, aunque con la ventaja adicional de mantener estable el factor de potencia, lo que indica eficiencia energética sin sobreconsumo de explosivo.

En nuestro caso la mezcla explosiva mantuvo su factor de potencia estable, el registro marco un 0.686 kg/t sin Kallpex y un 0.701 kg/t con Kallpex sobresaliendo una diferencia mínima de aumento del 0.015.

Respaldo por, Kolev y Tsonev (2022) se señala que los explosivos aluminizados tienen una mayor presencia de energía de explosión debido a la reacción exotérmica del aluminio con el oxígeno disponible en los productos gaseosos de detonación, mejorando la presión de empuje sin requerir un incremento significativo en cuanto a la densidad de carga. Permite explicar de manera técnica el porqué del factor de potencia en Antapaccay permaneció prácticamente constante.

Sin embargo, es importante destacar que Gonzales Chocue y Correa (2024) señalaron que los explosivos tipo hidrogel aluminizados presentan como ventaja su manejabilidad por el bajo índice de sensibilidad al roce e impacto. Nuestra experiencia con el Kallpex matiza esta afirmación, pues si bien el producto es estable en términos de sensibilidad, su alta viscosidad (15,000 a 35,000 cp) y tendencia a la sedimentación generaron importantes dificultades operativas durante el trasegado y almacenamiento.

Aquello demandó modificaciones en los camiones fábrica y protocolos especializados. Esta discrepancia puede explicarse porque el Kallpex, al ser una emulsión con alto contenido de sólidos (aluminio granulado), presenta propiedades reológicas particulares que no necesariamente comparte con otros hidrogeles aluminizados.

En cuanto a la seguridad de las voladuras, los valores de velocidad máxima de partícula (PPV) se mantuvieron por debajo de los 20 mm/s, cumpliendo con la norma alemana DIN 4150, que establece como rango aceptable para construcciones sensibles entre 20 y 50 mm/s (Instituto Alemán de Normalización, 2015). Este resultado es particularmente relevante considerando que, como advierten Kolev y Tsonev (2022), los explosivos aluminizados generan mayor presión de detonación y temperatura, lo que podría incrementar las vibraciones.

Sobre los resultados obtenidos respecto de la validez del uso de Kallpex debe tomar en cuenta que aquellos son una mejora dependiente y relativa. La ganancia en fragmentación fina (2% adicional respecto a Vertex) solo fue demostrada bajo las siguientes condiciones operativas específicas ². Estimamos que cuando alguna de estas condiciones varíe significativamente (por ejemplo, burden reducido a 4.0 m o presencia de agua >20%), la mejora en fragmentación desaparecía o incluso se generaba sobretrituración y mayor proyección de fragmentos (flyrock). Por lo tanto, la efectividad del Kallpex está condicionada a un diseño de voladura específico y a un control estricto de los parámetros operativos

Nuestros datos demuestran que, con un diseño adecuado de malla y secuencia de disparo, es posible aprovechar la mayor energía del Kallpex sin comprometer los estándares de seguridad sísmica. Cabe resaltar que sobre la vibración sería el elemento de mayor observancia en temas de seguridad para la empresa minera Antapaccay, en tanto el registro se fijó en casi un redoble de los niveles de vibración.

Sin embargo este aumento todavía se conserva dentro de los estándares internacionales del DIN 4150 sobre vibración en yacimientos mineros, por lo que reduce el tema a un asunto de estricta seguridad ocupacional de los operarios y demás personal necesario para la voladura, así como también para la protección de instrumentos necesarios para este fin tales como los taladros de perforación y otros objetivos.

² Tipo de roca: Diorita con resistencia a compresión uniaxial entre 100 y 140 MPa. Geometría de perforación: Malla de 5.2 x 5.0 m, burden real entre 4.8 y 5.0 m, espaciamiento entre 5.0 y 5.2 m. Secuencia de iniciación: Retardos entre taladros de 6 ms y entre filas de 17 ms, con detonadores electrónicos. Confinamiento: Longitud de taco no menor a 2.5 m, material de taco granular seco. Humedad del taladro: Taladros secos o con nivel de agua menor al 10% de la profundidad.

Desde la perspectiva metodológica de Coronel (2023) sostiene que los resultados se deben analizar considerando tanto a las variables dependientes como las de control, siendo aplicado para este caso se reconocería que la vibración no va a depender únicamente del tipo explosivo, sino también de la geometría del disparo, espaciamiento y las condiciones geomecánicas.

Por el lado de Giraldo (2020) se señala que las mezclas con aluminio fino tienden a presentar variaciones en cuanto a su estabilidad física cuando no es mantenida en condiciones de agitación constante, coincidiendo con la experiencia reportada durante el traslado desde la planta hasta llegar al yacimiento.

Respecto a los desafíos operativos identificados, la sedimentación del Kallpex durante el almacenamiento y transporte coincide con lo reportado por Gonzales Dota (2022), quien observó que el ANFO aluminizado presentaba problemas de segregación de componentes. No obstante, en nuestro caso, la alta viscosidad de la emulsión agravó este fenómeno, generando obstrucciones en bombas y líneas de descarga.

La literatura especializada en reología de emulsiones explosivas, como los trabajos de Meda et al. (2019), indica que las emulsiones con alto contenido de fase sólida tienden a presentar fenómenos de sinéresis y sedimentación cuando no se mantienen en condiciones de agitación constante, lo que explica las dificultades observadas en Antapaccay cuando el producto permanecía estático por períodos prolongados.

Tabla 7 Estadísticos descriptivos y prueba t para indicadores de voladura

Parámetro	Vertex (n=12)	ANFO convencional (n=8)	Kallpex al 10% (n=10)	Diferencia (Kallpex vs Vertex)	Prueba estadística
Fragmentación fina (% < 1 pulgada)	46.2% (±2.1%)	43.5% (±2.5%)	48.5% (±1.8%)	+2.3%	t(20)=2.81, p=0.011
P80 (pulgadas)	2.68 (±0.22)	2.91 (±0.31)	2.28 (±0.19)	-0.40 pulg	t(20)=-3.12, p=0.005

Factor de potencia (kg/t)	0.686 (±0.031)	0.712 (±0.028)	0.701 (±0.025)	+0.015 (ns)	t(20)=1.21, p=0.240
PPV (mm/s) – pico	9.2 (±2.1)	8.5 (±1.9)	16.8 (±2.4)	+7.6	t(20)=8.45, p<0.001
Tiempo entre filas (ms)	12.3 (±1.5)	11.8 (±1.2)	18.2 (±1.8)	+5.9 ms	t(20)=9.02, p<0.001
Top size (pulgadas)	14.8 (±1.4)	15.6 (±1.7)	13.2 (±1.1)	-1.6 pulg	t(20)=-2.98, p=0.007

Nota: ns = no significativo ($p>0.05$); estadísticamente significativo (prueba t de Student para muestras independientes, $\alpha=0.05$). Fuente: Elaboración propia

Para la significancia de esta comparación se realizó la prueba de t de student, método estadístico paramétrico utilizado para comparar las medias de dos o más grupos. Complementariamente, podemos afirmar que la mejora en la fragmentación fina (de 46.2% a 48.5%) es estadísticamente significativa ($p=0.011$). Sobre el P80, la reducción de 0.40 pulgadas (de 2.68 a 2.28) es significativa ($p=0.005$).

Esto implica un material más homogéneo y adecuado para chancado. Sobre el factor de potencia no se encontraron diferencias significativas ($p=0.240$), lo que confirma que el Kallpex no incrementa el consumo de explosivo por tonelada, respaldando la eficiencia energética. Finalmente, sobre la vibración señalada el aumento de 7.6 mm/s (de 9.2 a 16.8) es significativo ($p<0.001$), pero se mantiene dentro del límite DIN 4150 (<20 mm/s). Este hallazgo justifica la recomendación de monitoreo estricto.

De otro lado, conforme los registros, se identificaron 8 eventos que usaron exclusivamente Vertex (sin Kallpex) y 10 eventos que usaron Kallpex al 10% (los restantes usaron mezclas HA73G u otros). Los resultados comparativos se muestran a continuación.

Retomando el tema de la movilización del producto Kallpex desde la fábrica de producción hacia el yacimiento supone el asunto de mayor productividad, esto al atender los hechos sobre su sedimentación temprana cuando el mismo se encuentra continuamente expuesta a temperaturas altas. Ahora bien, cabe resaltar que este no es un problema de seguridad ocupacional sino de eficiencia sobre el riesgo de pérdida de material y la inutilización de sistemas de bombeo de material.

Desde una perspectiva operativa, las modificaciones implementadas en los camiones fábrica, incluyendo la instalación de mangueras para inyección de petróleo que lubrican la bomba de Kallpex, representan una solución práctica al problema de desgaste de equipos señalado por Lazarte (2025) en su estudio con explosivos gasificados. Este autor enfatizó la necesidad de respetar tiempos de gasificación; en nuestro caso, la lección aprendida se centra en la importancia de adecuar los sistemas de bombeo a las características reológicas específicas del aditivo.

En el ámbito normativo, los resultados confirman la necesidad de cumplir estrictamente con la Ley N° 30299 y su reglamento, que regulan el transporte, almacenamiento y uso de explosivos industriales en Perú. Las fichas de datos de seguridad del Kallpex, que identifican peligros como comburente (H272), irritante ocular (H319) y nocivo para organismos acuáticos (H412), fueron validadas en la práctica durante la manipulación del producto, confirmando la pertinencia de las medidas de protección personal y ambiental implementadas.

Finalmente, es importante contrastar nuestros resultados con la investigación de Gormas y López (2022) en canteras no metálicas. Mientras estos autores encontraron que el ANFO aluminizado era adecuado para rocas con resistencia a compresión entre 10 y 50 Mpa, en Antapaccay, con rocas dioritas de mayor dureza, el Kallpex demostró ser efectivo incluso en condiciones de humedad, confirmando la versatilidad de las emulsiones aluminizadas para diferentes contextos geomecánicos.

En síntesis, la discusión de resultados evidencia que el Kallpex constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar los elementos fundamentales de la voladura minera, siempre y cuando se gestionen adecuadamente los desafíos asociados a su viscosidad y sedimentación mediante protocolos específicos de manipulación, equipos adaptados y personal capacitado.

Ahora bien, los estudios sobre el trasegado revelan aspectos críticos que deben ser considerados para optimizar la implementación del aditivo aluminizado en las operaciones de voladura. Este informe técnico, fundamentado en observaciones directas durante el proceso de descarga, aporta evidencia empírica sobre el comportamiento reológico del producto y sus implicaciones logísticas.

Conforme la investigación no se trata de crear un nuevo sistema de transporte, almacenamiento y bombeo sino de una optimización del sistema ya presente que naturalmente

se utiliza para aditivos tales como el Vertex sumando a este solo mejores precisiones y cuidados del material Kallpex, aquello en suma para la conservación y utilización eficiente del producto.

El hallazgo más relevante del informe es la confirmación de que el Kallpex experimenta un proceso de decantación significativa durante el transporte, generando un incremento de hasta el 100.3% en su viscosidad respecto a los valores reportados por Planta Cachimayo. Este fenómeno, documentado mediante muestreo diferencial entre la parte superior e inferior de la cisterna, explica las obstrucciones recurrentes en bombas y líneas de descarga que se observaron durante la fase de implementación.

La sedimentación progresiva del aluminio, componente energético principal del aditivo, no solo afecta la fluidez del producto, sino que compromete su homogeneidad, lo que podría traducirse en un comportamiento inconsistente durante la voladura si no se corrige antes del carguío.

Los resultados evidencian una brecha entre los parámetros de calidad certificados en origen y las condiciones reales del producto al arribar a la unidad minera. Esta situación podría subsanarse a través de la implementación de un protocolo de verificación en destino que incluya mediciones de viscosidad, densidad y homogeneidad previas al trasegado hacia los silos de almacenamiento. La implementación de un sistema de control de calidad en dos etapas (origen y destino) permitiría detectar desviaciones antes de que el producto ingrese al circuito operativo, evitando las interrupciones documentadas durante el proceso de descarga.

Las obstrucciones recurrentes en el sistema de bombeo evidencian que la infraestructura convencional para manejo de emulsiones resulta insuficiente para productos con alta carga de sólidos como el Kallpex. La recomendación sería implementar un sistema de bombeo especializado para altas viscosidades como un requisito técnico indispensable.

Además, conviene destacar que existen elementos para el diseño de procedimientos operativos específicos. En primer lugar, se debe realizar una purga posterior al trasegado a través de un soplado con aire inmediatamente después de la descarga; aquello responde a la necesidad de eliminar residuos de material altamente viscoso que, al permanecer en mangueras y tuberías angostas, polimerizan y generan obstrucciones crónicas.

Otra recomendación, también señalada por Enaex, es la prevención por medio del monitoreo del mismo proveedor, esta debe estar presente durante las operaciones críticas de descarga constituye un mecanismo de transferencia tecnológica y aseguramiento de calidad.

Las recomendaciones previamente señaladas permitirán validar en campo las propiedades del producto y ajustar los procedimientos de manera colaborativa. Por último, la estandarización del trasegado implica realizarlo bajo los IBS (procedimientos estándar) como medida preventiva sugiere que las desviaciones observadas podrían estar asociadas, al menos parcialmente, a variaciones en la ejecución del procedimiento.

Todo aquello en pro de conservar la estabilidad del producto en la voladura, en especial de su factor de potencia, su grado de fragmentación y la sostenibilidad de su magnitud vibratoria la cuál podría considerarse alta pero aceptable según los estándares normativos.

Todos estos aspectos constituyen un ejemplo de gestión basada en evidencia, documentando desviaciones y proponiendo soluciones específicas. Su existencia demuestra que la implementación del Kallpex en Antapaccay ha sido acompañada de un monitoreo riguroso que permite identificar oportunidades de mejora y ajustar los procedimientos en tiempo real.

Entonces, las desviaciones operativas detectadas desde el trasegado complementan los hallazgos técnicos sobre eficiencia de fragmentación al revelar que el éxito de la implementación del Kallpex depende críticamente de resolver los desafíos logísticos asociados a su comportamiento reológico, mediante infraestructura especializada, protocolos de verificación y colaboración estrecha con el proveedor.

Para finalizar, la creación un proceso completo para el empleo de Kallpex se complementa por medio de una comparativa con los resultados obtenidos por Flores (2025) en la unidad minera Constancia (Cusco, Perú) sobre la implementación del Vertex como elemento de emulsión para el mejoramiento de la fragmentación en la práctica de voladura. Completamente relacionado con la hipótesis, los resultados del investigador mencionado tenemos que se obtuvieron fragmento de 2.11 pulgadas, un 50.82% de finura y un promedio de P80 de 1.81 a 2.68 pulgadas, datos similares a los registrados en nuestro propio registro.

La diferencia, se notó cuando se incluyeron en la mezcla el aditivo aluminizado Kallpex, en tanto, los resultados iniciales con productos, como el Vertex, vieron un incremento del 2% en el promedio de fragmentación fina (menor a 1 pulgada) respecto a los explosivos convencionales, alcanzando valores máximos de 48%. Cabe mencionar también sobre la estabilidad del factor de potencia estable en promedio a 0,64 kg/t lo cual evidencia mejores resultados en las pruebas en función a la misma cantidad de explosivo utilizado.

Conclusiones

Primera.- La implementación del aditivo aluminizado Kallpex (10% en peso) en la mina Antapaccay mejoró la fragmentación fina en un 2% respecto a explosivos convencionales, siempre que se cumplieran simultáneamente las siguientes condiciones: roca diorita de alta resistencia, malla de perforación optimizada (5.2 x 5.0 m), burden y espaciamiento controlados, taladros secos, y secuencia de iniciación con retardos precisos. Fuera de este rango operativo, el beneficio se reduce o anula. No se recomienda superar el 12% de aluminio, pues se generan problemas de sedimentación y viscosidad sin ganancia adicional en fragmentación.

Segunda.- La revisión de los beneficios derivados del uso de explosivos con aditivos aluminizados en Antapaccay revela ventajas técnicas cuantificables que justifican su incorporación en operaciones de tajo abierto. El análisis comparativo de 30 eventos de voladura demostró que el Kallpex, al contener más del 20% de aluminio granulado, incrementó el promedio de fragmentación fina (menor a 1 pulgada) alcanzando picos del 48% en roca diorita, superando los resultados obtenidos con aditivos convencionales como Vertex.

Tercera.- A partir del análisis de las fichas técnicas, informes de desviaciones operativas y observaciones de campo, se diseñó un proceso integral para la gestión del Kallpex que aborda las particularidades críticas de este aditivo aluminizado. El proceso propuesto contempla cinco etapas fundamentales: obtención con control de calidad dual (origen y destino), almacenamiento en condiciones controladas de temperatura y ventilación, transporte con señalización conforme a la normativa de materiales peligrosos (Ley N° 28256 y D.S. N° 021-2008-MTC), manipulación con equipos de protección específicos ante riesgos H272, H319, H316 y H412, y utilización en voladura con sistemas de bombeo especializados para alta viscosidad.

Cuarta.- La evaluación sistemática de los resultados de voladura con explosivos mejorados con Kallpex, basada en 30 eventos analizados durante 2025, confirma la superioridad técnica de este aditivo en términos de fragmentación controlada y eficiencia operativa. Los datos recopilados indican que las voladuras con Kallpex alcanzaron un P80 promedio inferior al obtenido con explosivos convencionales, con picos de rendimiento en roca diorita utilizando mallas de perforación de 5.2 x 5.0 m. Se evidenció que los tiempos entre taladros y entre filas fueron más controlados y prolongados en promedio (6 segundos adicionales respecto a Vertex), lo que permitió una mejor secuenciación de la detonación y mayor seguridad operativa.

Quinta.- La hipótesis de trabajo fue confirmada por los resultados de investigación, se tiene que el uso de Kallpex mejora la eficiencia de fragmentación de roca y el recojo de mineral con un granulado menor a la pulgada de tamaño, no obstante, aunque la hipótesis operativa ha sido confirmada, deberán tomarse en cuenta los riesgos ambientales y humanos presentados en las pruebas de voladura utilizados, ya que el incremento de la fuerza de explosión también implicará un estudio previo sobre el plan de seguridad ya que el plan actual se encuentra pensando para una práctica de voladura de explosivos de menor potencia.



Recomendaciones

Primera. – Con el fin de implementar el Kallpex como el aditivo aluminizado principal para el procedimiento de voladura en la mina Antapaccay, sería recomendable configurar un sistema de gestión íntegro que contemple el abordaje de desafíos de planeamiento y operatividad identificados. Dicho sistema deberá estimar la colaboración multisectorial y colaborativo de las empresas relacionadas con la actividad de voladura en superficie. Dicho esto, es necesario, además de compartir la experiencia de uso, realizar sendos esfuerzos de capacitación de personal.

Segunda. – Es recomendable realizar estudios sobre el chancado y la molienda del mineral extraídos. Complementaria a la información principal esta data ayudará a definir el porcentaje de fragmentación útil dependiendo del extracto de material útil, aquello generaría un estudio de mayor amplitud donde se tomen en cuenta curvas tales como el coste-beneficio y/o de desempeño.

Tercera. – Para la implementación correcta del Kallpex como aditivo aluminizado principal para el mejoramiento de resultados de fragmentación de roca y la adquisición de minerales se debe respetar los criterios de control de calidad, monitoreo constante del trasegado, participación de personal especializado en la fabricación de Kallpex y capacitación continua del personal en manejo de materiales peligrosos.

Cuarta. – Es recomendable proponer un monitoreo estricto para evaluación de resultados de voladura en la mina Antapaccay. Los indicadores a tomar en cuenta deben contemplar los resultados sobre los siguientes puntos: a) clave de desempeño (KPI) como P80, b) porcentaje de fragmentación fina, c) factor de potencia, d) PPV y e) tiempos entre taladros.

Quinta.- Además de los estudios sobre los beneficios prácticos de la voladura potenciada con Kallpex es propicio realizar un estudio específico sobre su impacto ambiental, aquello bajo el estricto resultado del aumento del registro vibratorio, el mismo que aun cuando se encuentre dentro de los límites aceptados por la normatividad internacional, resultan relevantes para medir y calcular los porcentajes de Kallpex utilizables sin afectar al ambiente en general como a la salud ocupacional de los trabajadores encargados.

Referencias

- Alza, R. (10 de junio de 2025). *Antapaccay planea operación hasta 2052 gracias a nuevo desarrollo*. Rumbo Minero Internacional. Recuperado el 30 de setiembre de 2025. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/antapaccay-planea-operacion-hasta->
- Aranzamendi, L. (2015). *Instructivo teórico-práctico del diseño y redacción de las tesis el Derecho. Segunda edición*. Grijley.
- Barriga, C. P., y Calderon, M. V. (2021). Use of gas emulsion in blasting project for clearing in a copper mine in southern Peru [Uso de emulsión de gas en proyecto de voladura para desmonte en una mina de cobre en el sur del Perú]. *International Journal Of Engineering And Management Research*, 11(5), 157-174.
- Biessikirski, A., Kuterasiński, Ł., Dworzak, M., Pyra, J., y Twardosz, M. (2019). Comparison of structure, morphology, and topography of fertilizer-based explosives applied in the mining industry. *Microchemical Journal*, 144, 39-44.
- Cámara de Comercio, Industria, Servicios, Turismo de la Producción del Cusco. (21 de marzo de 2015). *La minería en cusco: producción, precios y exportaciones (2022-2024)*. Centro de Estudios Empresariales. <https://www.camaracusco.org/la-mineria-en-cusco-produccion-precios-y-exportaciones-2022-2024/>
- Conarsac. (1 de junio de 2023). *Explosivos en minería*. <https://conarsac.com/blog/explosivos-en-mineria/>
- Coronel, C. (2023). Los objetivos de la investigación. *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 27. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552023000100048&lng=es&tlng=es.
- Cotrina, M., Marquina, J., Mamani, J., Gonzalez, J., Arango, S., Noriega, E., Donaire, T., y Quispe, R. (2024). Machine Learning Techniques for Predicting the Quantity of ANFO Used in Blasting a Bench in an Open Pit Mine [Técnicas de aprendizaje automático para predecir la cantidad de ANFO utilizada en la voladura de un banco en una mina a cielo abierto]. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11 (10).
- Díaz, F. (2023). *La química de los explosivos primarios más representativos y el 1, 3, 5-trinitro 2, 4, 6, trinitroaminobenceno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de

México]. Repositorio Institucional.
<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/ccfaa77f-e282-457a-9160-8c98e06c2b94/content>

Giraldo, E. (2020). Formulación óptima de anfo aluminizado para voladuras en minería subterránea. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 23(46), 95-103.

Gonzales Chocue, M., y Correa, M. (2024). *Diseño de un sistema de costos basado en un modelo industrial para empresas del sector minero del departamento del Cauca* [Trabajo de pregrado, Corporación Universitaria Comfacaucá]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unicomfacaucá.edu.co/handle/3000/146>

Gonzales, B. (2022). *Optimización de los procesos de perforación y voladura en la Sociedad Minera Nueva Rojas, concesión Bella Rica, Camilo Ponce Enríquez – Azuay* [Tesis de pregrado, Universidad de Azuay]. Repositorio Institucional. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12500>

Gormas, R., y López, H. (2022). *Propuesta de un plan de minado para incrementar la productividad en una cantera no metálica en Cajamarca 2022* [Trabajo de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/11537/31523>

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición). McGrawHill Education.

Industry Research. (16 de enero de 2026). *Commercial explosives market report*. <https://www.industryresearch.biz/market-reports/commercial-explosives-market-110520>

Kolev, S., y Tsonev, T. (2022). Aluminized enhanced blast explosive based on polysiloxane binder [Explosivo aluminizado mejorado a base de aglutinante de polisiloxano]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 47(2), e202100195.

Lazarte, J. (2024). *Mejora del ratio de excavación de las palas de carguío mediante el uso del explosivo gasificado HA73G Emulgex en voladuras de minería superficial, Región Cusco, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/14155>

- Leidig, M., Bonner, J. L., Rath, T., y Murray, D. (2010). Quantification of ground vibration differences from well-confined single-hole explosions with variable velocity of detonation [Cuantificación de las diferencias en la vibración del suelo a partir de explosiones de un solo pozo bien confinadas con velocidad de detonación variable]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1), 42-49.
- León, B. (2021). *Aplicación de la mezcla explosiva Quantex 73 para la optimización de la voladura primaria en la fase 2 del tajo Toromocho - Cia minera Chinalco Morococha Junín 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Micaela Bastidas]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1044>
- León, V. (2 de marzo de 2024). *Cusco: explosión en minera informal explota y deja un muerto y 13 heridos*. Infobae. <https://www.infobae.com/peru/2024/03/02/cusco-explosion-en-minerainformal-explota-y-deja-un-muerto-y-13-heridos/>
- Mertuszka, P., Kramarczyk, B., Pytlik, M., Szumny, M., Jaszcz, K., & Jarosz, T. (2022). Implementation and verification of effectiveness of bulk emulsion explosive with improved energetic parameters in an underground mine environment. *Energies*, 15(17), 6424.
- Mesec, J., Žganec, S., y Kovač, I. (2015). In-hole velocity of detonation (VOD) measurements as a framework for the selection type of explosive. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 675-680.
- Sociedad Nacional de Minería de Chile. (2016). *Manejo de explosivos*. SONAMI. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/5.Manejo-Explosivos.pdf>

Anexo 1. Matriz de consistencia

Preguntas	Objetivos	Hipótesis	Metodología
General	General	La implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva utilizada para voladuras en roca diorita en la empresa minera de sulfuro de cobre en la región Cusco incrementará la eficiencia del proceso de voladura, mejorando la fragmentación fina de la roca (<1 pulgada) en al menos 2 puntos porcentuales respecto al uso de Vertex, manteniendo un factor de potencia ≤ 0.70 kg/t y una velocidad máxima de partícula (PPV) menor a 20 mm/s.	Tipo: Aplicada Nivel: Descriptivo Diseño: Cuasi experimental Población: Voladoras monitoreadas en una mina de sulfuro de cobre de Cusco en el 2025. Muestra: procesos de voladura realizado en el campo territorial de tajo abierto de la mina. Técnicas: Documental y observación
¿Cuál es el impacto de la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva sobre los resultados de fragmentación y desempeño de la voladura en la empresa minera de sulfuro de cobre en la región Cusco 2025?	Determinar el impacto de la implementación del aditivo aluminizado Kallpex en la mezcla explosiva sobre los resultados de fragmentación y desempeño de la voladura en la empresa minera de sulfuro de cobre en la región Cusco 2025.		
Específicos	Específicos		
¿Qué beneficios genera el uso de explosivos con aditivos aluminizados en el proceso de voladura de la empresa minera de sulfuro de cobre en la región Cusco?	Analizar los beneficios del uso de explosivos con aditivos aluminizados en el proceso de voladura de la empresa minera de sulfuro de cobre en la región Cusco.		
¿Cómo debe diseñarse un proceso técnico para la obtención, almacenamiento y utilización responsable del aditivo Kallpex?	Diseñar un proceso técnico para la obtención, almacenamiento y utilización responsable del aditivo Kallpex en mezclas explosivas.		
¿Qué resultado de fragmentación, factor de potencia y vibración se obtienen mediante voladuras realizadas con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex?	Evaluar los resultados de fragmentación, factor de potencia y vibración obtenidos mediante voladuras realizadas con explosivos mejorados con el aditivo Kallpex.		

Anexo 2. Informe sobre trasegado elaborado por Enaex



Julio 2025

Desviaciones Operativas en el Trasegado
Antapaccay - KALLPEX 21.07.2025



EMTS



CONTENIDO

- ☐ El presente informe evalúa el comportamiento del Kallpex al momento del trasegado en Antapaccay.
- ☐ Se realizó controles operativos al momento de la descarga, extrayendo muestras de la parte inferior y de la parte superior, evidenciando diferencias respecto a la información de envío por parte de Planta Cachimayo .
- ☐ Se evidenció que el producto cuenta con una decantación evidente, lo que genera problemas operativos
- ☐ Previamente al trasegado al Silo N° 4 se realizó la verificación de que tanto la tubería y manguera de descarga no se encuentren atorados, esta confirmación se realizó mediante la incorporación de aire a presión por los conductos.

En la unidad antapaccay se observan los siguientes problemas al momento del abastecimiento

- Parte superior del cisterna
- ☐ Viscosidad :30 550 Cp
 - ☐ Temperatura :18.3 °C
 - ☐ Densidad :1.654 %



- Parte inferior del cisterna
- ☐ Viscosidad :17 150 Cp
 - ☐ Temperatura :18.3 °C
 - ☐ Densidad :1.549 %



Se observa que el cisterna no cuenta con una uniformidad homogénea.



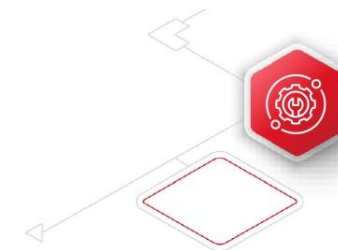
Presencia de material altamente viscoso.



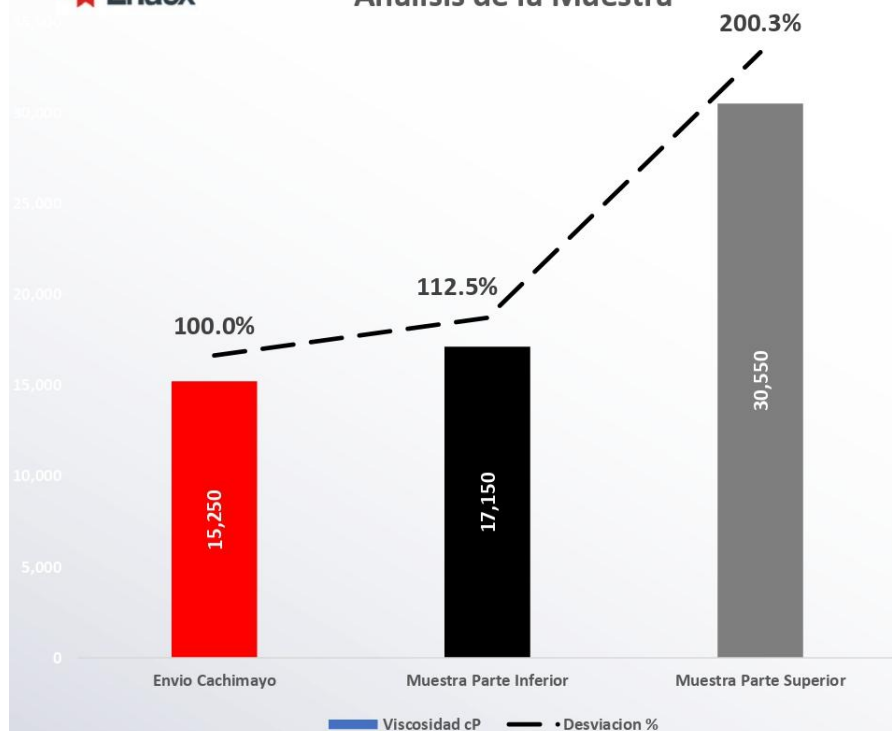
Obstrucción de la bomba de descarga

- ☐ Se vuelve a observar una decantación de aluminio en el Kallpex el cual genera una variación en su viscosidad, durante el trasegado se evidencian obstrucciones al momento del trasegado.

- ☐ Durante el proceso de trasegado del Kallpex, se evidencia una obstrucción operativa. Este fenómeno afecta directamente la continuidad del flujo, **generando acumulaciones de material con alta viscosidad en las zonas inferiores del sistema de descarga.**



Análisis de la Muestra



El día 21.07.2025 se evidenció que la viscosidad en la parte inferior del cisterna se incrementó en un 100.3 %, mientras que en la parte inferior se observó un incremento del 12.5 %. Estos resultados indican que, con el transcurso del tiempo, el producto pierde su homogeneidad inicial, manifestando una sedimentación significativa lo que ocasiona un atascamientos al momento del trasegado.

INCASA N° 004184-CC-2025

1. DATOS GENERALES

Cliente: ANTAPACCAY
 Ubicación: SILO IBCS
 Presentación: CISTERNA DE 30 TM
 Producto: MATRIZ KALLPEX
 Guía de remisión fabricante: 001508
 Guía de remisión chemtrade: 00-

Fecha de Análisis: 19/07/2025
 Fecha de Emisión: 20/07/2025
 Fecha de Fabricación: 19/07/2025
 Vehículo: VCU-875

2. RESULTADO DE ANÁLISIS

PRUEBAS	ESPECIFICACIONES	RESULTADO
Viscosidad	15000 cP a 35000 cP	15250
Densidad	1.40 - 1.70 Kg/L	1.506

Metodología de medición: Viscosidad por viscosímetro Brookfield, aguja 7, 25RPM; densidad por método gravimétrico, ambos parámetros medidos a temperatura < 30 °C.

- ☐ El explosivo KALLPEX presentó una decantación durante el transporte, lo que ocasionó un aumento de hasta el 100.3 % en su viscosidad con respecto al valor de envío.
- ☐ Se evidenció una pérdida de homogeneidad y estabilidad del producto, generando dificultades operativas durante el proceso de trasegado.
- ☐ La presencia de material altamente viscoso en la parte inferior del cisterna, produjo obstrucciones en la bomba de descarga, lo que derivó en interrupciones operativas.
- ☐ La sedimentación progresiva del aluminio afecta negativamente la fluidez del producto.
- ☐ Las fallas en el sistema de bombeo evidencian la necesidad de aplicar procedimientos de verificación de calidad y control de viscosidad antes del trasegado al Silo.

RECOMENDACIONES

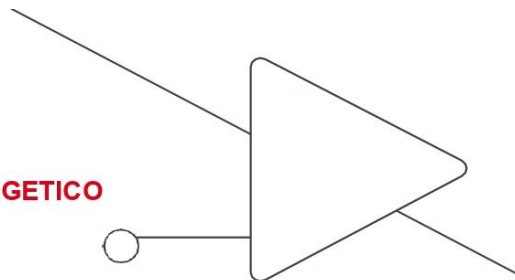
- ☐ Implementar un sistema de bombeo especializado para el manejo de productos con alta viscosidad, que minimice el riesgo de obstrucción durante el trasegado.
- ☐ Exigir a Planta Cachimayo la certificación del control de calidad antes del despacho, incluyendo parámetros como viscosidad, estabilidad y evidencia de pruebas de homogeneidad.
- ☐ Realizar el trasegado bajo en los IBS como procedimiento estándar para prevenir próximas complicaciones.
- ☐ Ejecutar una purga del sistema de descarga (soplado con aire) inmediatamente después del trasegado, para evitar la acumulación de residuos en zonas de difícil acceso como mangueras y tuberías angostas.
- ☐ Solicitar la participación continua del personal técnico de Planta Cachimayo durante las operaciones críticas de descarga, con el fin de validar en campo las propiedades del producto.

Anexo 3. Ficha técnica Kallpex

KALLPEX

Hoja técnica
Código: PE-ENX-CA-QC-L-HT60
Versión: 01/2025

ADITIVO ENERGÉTICO



PRESENTACIÓN

Presentación a granel, se transporta en unidades especialmente acondicionadas para este fin, almacenados en contenedores isotermos en las unidades mineras.

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Aspecto	Aditivo energético
Color	Gris
Solubilidad en agua	Insoluble en agua
Densidad	1.40 - 1.70 Kg/L
Viscosidad *	15000 cP a 35000 cP
Tiempo de vida útil **	30 días

* Viscosidad medida con viscosímetro Brookfield, spindle 7 (T-E), a 20 rpm y entre 20-25°C.

** En condiciones normales de almacenamiento (temperatura fluctúa entre 0 y 25°C).

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

KALLPEX es un aditivo que contiene en suspensión sólidos de aluminio, cuya función principal es incrementar la energía a las mezclas explosivas usadas en Minería a tajo abierto con aplicación en roca de mayor dureza.

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Comburente

NFPA

Nº UN



3375

USOS

Se usa como aditivo que incrementa energía, a las mezclas explosivas como emulsiones y ANFOs pesados vaciables y bombeables, este producto es especialmente recomendado para voladuras en minería de superficie desarrollado para roca dura, que además puede presentar agua.

ALMACENAMIENTO

- Almacenar en un ambiente seco, fresco, limpio y bien ventilado.
- Evitar la exposición del producto a la luz solar o fuentes de calor.
- Evitar cambios bruscos de temperatura.
- Evitar almacenar y/o mezclar con sustancias incompatibles: ácidos, oxidantes, peróxidos, cloratos, zinc, cobre y aleaciones.

PRECAUCIONES

Uso obligatorio de equipos de protección personal, guantes lentes de seguridad, no respirar los gases, en caso de contacto con los ojos y piel lavarse inmediatamente con abundante agua y acudir a un médico.

Industrias Cachimayo S.A.
Av. Agustín Gamarra #100- Cachimayo -Anta-Cusco
Teléfono: +51 1 5141190 Anexo-9143- Cusco

CHEMTRADES.A.C. Planta Industrial
Panamericana norte kilómetro 177, Végueta – Huaura - Lima – Perú
Teléfono: +51 995148154

ADVERTENCIA

Industrias Cachimayo SA/ Chemtrade S.A.C. considera que el contenido y las recomendaciones tienen por finalidad informar al usuario. Los datos consignados en la presente Hoja Informativa, fueron obtenidos de fuentes confiables. Sin embargo, se entregan sin garantía expresa o implícita respecto de su exactitud o corrección. Las opiniones expresadas en este formato son de profesionales capacitados y la información entregada es la conocida actualmente sobre la materia. Considerando que el uso de esta información y del producto está fuera del control del Proveedor, la empresa Industrias ChemtradeS.A.C. no asume responsabilidad alguna por este concepto. El determinar las condiciones de uso seguro del producto es obligación del comprador y usuario.



Anexo 4. Ficha de datos de seguridad del Kallpex

GP-CA-HSECQ-F10

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

1 IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA

1.1	Identificación de producto químico	KALLPEX
1.2	Marcas registradas	No aplica.
1.3	Uso recomendado del producto químico y restricciones	KALLPEX es un aditivo que contiene en suspensión solidos de aluminio, cuya función principal es incrementar la energía a las mezclas explosivas usadas en Minería a tajo abierto con aplicación en roca de mayor dureza.
1.4	Fabricante	INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A.
1.5	Información del fabricante	Consultar ficha técnica del fabricante, entregado por INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A.
1.6	Datos sobre el proveedor	AV. AGUSTÍN GAMARRA N° 100 – CACHIMAYO – ANTA - CUSCO.
1.7	Teléfono de emergencia	51 15141190 anexo 9143 Cusco +51 954468942 +51 954462205

2 IDENTIFICACIÓN DEL PELIGRO O PELIGROS



2.1.	Clasificación	H272 Puede agravar un incendio; comburente. H319 Provoca irritación ocular grave H316 Provoca una leve irritación cutánea. H350 Puede provocar cáncer. H373 Puede provocar daño hematológico, timo e hígado tras exposiciones prolongadas o repetidas. H412 Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
2.2.	Palabras de advertencia Indicaciones de peligro	P201 Procurarse las instrucciones antes del uso. P202 No manipular antes de haber leído y comprendido todas las precauciones de seguridad. P210 Mantener alejado del calor, superficies calientes, chispas, llamas al descubierto y otras fuentes de ignición. No fumar. P220 Mantener alejado de la ropa y otros materiales combustibles. P260 No respirar polvo/humos/gas/nieblas/vapores/aerosoles. P264 Lavarse las manos y cara cuidadosamente después de la manipulación. P273 No dispersar en el medio ambiente.
2.3.	Consejos de prudencia	P280 Usar guantes/ropa de protección/equipo de protección para los ojos/la cara P308+P313 EN CASO DE exposición demostrada o supuesta: consultar a un médico. P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. P337+P313 Si la irritación ocular persiste, consultar a un médico. P332+P313 En caso de irritación cutánea: consultar a un médico.
2.4.	Descripción del peligro	Puede agravar un incendio por probabilidad de explosión, comburente. Provoca irritación ocular grave

3 INFORMACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO

Componentes	Denominación química	Concentración	Número CAS	Número NU
Nitrato de amonio		menor a 32%	6484-52-2	1942
Agua		mayor a 50%		
petróleo		menor a 9%	68476-30-2	1202
Aluminio grado I		mayor a 30%	7429-90-5	1309

4 PRIMEROS AUXILIOS

4.1.	Inhalación	Retírelo de la exposición, muévelo inmediatamente a un área ventilada y consiga atención médica.
4.2.	Contacto con la piel	Lave la piel con abundante agua durante al menos 15 minutos y retire toda la ropa y zapatos contaminados. Si es necesario, llame a un médico. Lave y seque minuciosamente la ropa y los zapatos contaminados antes de volverlos a usar.
4.3.	Contacto con los ojos	Enjuagar con agua cuidadosamente durante 15 minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. Si la irritación ocular persiste, consultar a un médico.
4.4.	Ingestión	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Evacuar inmediatamente a un centro médico.
4.5.	Síntomas/efectos más importantes, efectos retardados	Efectos de una sobreexposición crónica (largo plazo). Condiciones médicas que se verán agravadas con la exposición al producto "No hay información disponible".
4.6.	Indicación de la necesidad de recibir atención médica inmediata y, en su caso, de tratamiento especial.	Acorde a las condiciones que se vean agravadas con la exposición del producto llevar a un centro de salud mas cercano para su atención inmediata con el médico y facilitar la información a la exposición del producto.

5 MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

5.1. Agentes de extinción	Incendio exterior: Utilizar abundante agua para enfriar y evitar posible explosión Incendio en la carga: No se debe combatir el fuego Puede explotar por calor o contaminación.
5.2. Medios de extinción apropiados	Pulvo químico seco multipropósito (ABC)
5.3. Agentes de extinción inapropiados	Ninguna
5.4. Precauciones para el personal de emergencia y/o los bomberos	Evite la inhalación de material o productos derivados de la combustión. Óxido de reducción, N2. La combustión que se produce es una reacción química de reducción-oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego, personal operativo use máscara de media cara con filtro multigas o máscara full face, personal bombero para mitigar utilice equipo de protección autónoma (EPRA).

6 MEDIDAS QUE DEBEN DE TOMAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

6.1. Precauciones personales	Evite los siguientes casos: Contacto directo con la sustancia (Uso de elementos de protección personal)
6.2. Equipo de protección y procedimientos de emergencia	Traje descartable, guantes de PVC, ropa de tela gruesa resistente a productos químicos, zapato de seguridad, Uso de máscara de medio rostro con filtro multigas solo en caso de contacto directo con la sustancia. húmedo, dejar secar en un lugar ventilado y luego introducir en un contenedor cerrado y seco
6.3. Precauciones medioambientales	Nunca verter el producto al suelo, cursos de agua, alcantarilla, recoger el residuo este debe ser dispuesto como especifica sección 13.
6.4. Métodos y materiales de contención, confinamiento y/o abatimiento	Derrames pequeños: Sectorizar y señalizar el área afectada. Absorba con arena o tierra luego recoja en bolsas o envases limpios para su posterior eliminación. Derrames grandes: Construir un dique o barrera más adelante del derrame si es que existe riesgo de contaminar aguas. Aísle el área del derrame a por lo menos 10 o 25 metros a la redonda. Solicite asistencia técnica a ENAEX.
6.5. Métodos y materiales de limpieza Recuperación Neutralización Disposición final.	Los residuos recogidos en bolsas o envases se realizará la disposición final por empresa operadora de residuos sólidos acorde a la sección 13.
6.6. Medidas adicionales de prevención de desastres.	No hay información disponible.

7 MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación	
7.1. Precauciones para la manipulación segura	No almacenar en lugares cercanos a fuentes de calor, chispas o llamas. No fumar en áreas de almacenamiento o utilización del producto.
7.2. Medidas operacionales y técnicas	Usar sólo con ventilación adecuada. No consumir alimentos o bebidas en áreas donde se utilice el material.
7.3. Otras precauciones	No consumir alimentos o bebidas en áreas donde se utilice el material.
7.4. Prevención del contacto	Utilizar equipo de protección personal (sección 8).
Almacenamiento	
7.5. Condiciones para el almacenamiento seguro	Almacenar en un área limpia, seca y bien ventilada. Mantener alejado de agentes reductores fuertes, ácidos y bases fuertes, materia orgánica, cromatos, zinc, aleaciones de cobre y metales en polvo.
7.6. Medidas técnicas	No almacenar en el mismo silo matrices de distinta formulación.
7.7. Sustancias y mezclas incompatibles	Ácidos, oxidantes, peróxidos, cloratos, cobre y sus aleaciones, zinc, sustancias químicas corrosivas, combustibles
7.8. Material de envases y/o embalaje	Camiones cisterna, cubitanque o silos

8 CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

Límites de exposición				
8.1. Producto terminado Matriz BEN-03	TLV-TWA	No Listado	TWA-STEL	No Listado
Elementos de protección personal				
8.2. Protección respiratoria	En caso de ventilación insuficiente, utilizar respirador con filtro para vapores/gases orgánicos.			
8.3. Protección de manos	Utilizar guantes impermeables.			
8.4. Protección de ojos	Lentes de seguridad de cristal o policarbonato, con protección lateral.			
8.5. Protección de la piel y el cuerpo	Utilizar ropa de protección corporal.			
8.6. Medidas de ingeniería	Procurar una buena ventilación.			

9 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico	Aditivo energético	Densidad relativa del vapor (aire=1)	No disponible
Forma en que se presenta	Solución acuosa	Densidad	1.40 - 1.70 Kg/L
Color	Gris	Solubilidad	Insoluble en agua.
Olor	No descrito	Coefficiente de partición	No aplica
pH	No aplicable	Temperatura de autoignición	No disponible
Punto de fusión/punto de congelamiento	No disponible	Temperatura de descomposición	No disponible
Punto de ebullición, punto inicial de ebullición y rango de ebullición	No disponible	Umbral de olor	No disponible
Punto de inflamación	66 °C ± 2 °C	Tasa de evaporación	No disponible
Límite de explosividad	T° corregida a nivel de mar 72 °C	Viscosidad	15000 cP a 35000 cP
Presión de vapor	No disponible	Otro	No disponible

10 ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

10.1. Estabilidad química	Estable almacenado en condiciones normales de presión y temperatura.
10.2. Reacciones peligrosas	No polimeriza.
10.3. Condiciones que se deben evitar	No almacenar cerca de fuentes de calor, chispa o fuego.
10.4. Materiales/sustancias incompatibles	Ácidos o bases fuertes, oxidantes, peróxidos, cloratos, cobre y sus aleaciones, zinc.
10.5. Productos peligrosos de la descomposición	Óxidos de nitrógeno

11 INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1. Toxicidad aguda	Nitrato de amonio	Sales metálicas
Oral (LD50)	2950 mg/kg	15900 mg/kg
Dérmica (LD50)	> 5000 mg/kg	No disponible
Inhalación (LC50)	> 88 mg/L	8,8 mg/L
11.2. Irritación /corrosión cutánea	Provoca leve irritación cutánea.	No disponible
11.3. Lesiones oculares graves/irritación ocular	Provoca lesiones oculares graves.	No disponible
11.4. Sensibilización respiratoria o cutánea	No disponible	No disponible
11.5. Mutagenicidad de células reproductoras/in vitro	Información en base a sustancias químicamente relacionadas no indica potencial de genotoxicidad in vitro.	
11.6. Carcinogenicidad	No existe evidencia contundente sobre la carcinogenicidad de los nitratos. El petróleo se clasifica como Susceptible de provocar cáncer.	
11.7. Toxicidad reproductiva	Nitrato de amonio: Estudios con sustancias químicamente relacionadas no han evidenciado efectos sobre la reproducción y el desarrollo.	
11.8. Toxicidad específica en órganos particulares – exposición única	Nitrato de amonio: Estudios con sustancias químicamente relacionadas no han evidenciado efectos sobre órganos particulares debido a exposición única.	
11.9. Toxicidad específica en órganos particulares – exposiciones repetidas	Nitrato de amonio: Estudios con sustancias químicamente relacionadas no han evidenciado efectos sobre órganos particulares tras exposiciones repetidas. Petróleo: Puede provocar daño hematológico, timo e hígado tras exposiciones prolongadas o repetidas.	
11.10. Peligro de inhalación	No aplica	

12 INFORMACIÓN ECOTOXICOLÓGICA

12.1. Ecotoxicidad (EC, IC y LC)	Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
12.2. Persistencia y degradabilidad	Fácilmente degradable.
12.3. Potencial bioacumulativo	No se prevé una bioacumulación.
12.4. Movilidad en suelo	Los iones amonio se pueden fijar a las partículas de arcilla y lixiviar lentamente. El ión nitrato es fácilmente lixiviable.
12.5. Otros efectos adversos	No aplica

13 INFORMACIÓN RELATIVA A LA ELIMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS

13.1. Residuos	Se deberá clasificar el residuo y disponer del mismo mediante una empresa operadora de residuos sólidos (EO-RS) autorizada ante el MINAM de acuerdo a la LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS, D.L. N° 1278, su modificatoria D.S. N° 001-2022-MINAM y su reglamento D. S. N° 014 – 2017 – MINAM.
13.2. Método de eliminación del producto en los residuos	Deben ser tratados como residuos peligrosos, y de acuerdo a la normativa vigente del país.

14 INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

	Modalidad de transporte		
	Terrestre	Marítimo	Aéreo
Regulaciones	D.S. N° 021-2008 MTC		
N° UN	3375	3375	Prohibido
Designación oficial de transporte de las naciones unidas	Emulsión de nitrato de amonio		Prohibido
Clasificación de peligro primario UN	5.1	5.1	—
Clasificación de peligro secundario NU	—	—	—
Grupo de embalaje/envase	II	II	—
Peligros ambientales	Tóxico para organismos acuáticos con efectos nocivos duraderos	Tóxico para organismos acuáticos con efectos nocivos duraderos	—
Precauciones especiales	—	—	—

15 INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

15.1. Normas internacionales aplicables	5.1 / COMBURENTE (OXIDER) I.M.D.G. = 5014 DOT = 43
15.2. Normas nacionales aplicables	Ley N° 28256 - Ley que regula el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos – 19/jun/04. DS 021-2008-MTC - Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. Ley N° 30299 Ley de armas de fuego, municiones, explosivos, productos pirotécnicos y materiales relacionados de uso civil y su reglamento D. S. N° 010 – 2017 IN.
15.3. Regulaciones internacionales	Naciones Unidas. Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas, vigésima primera edición. Naciones Unidas. Manual de Pruebas y Criterios, séptima edición. Naciones Unidas. Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA).

16 OTRA INFORMACIÓN

16.1. Abreviaturas y acrónimos	LPP: Límite permisible ponderado; LPT: Límite permisible temporal; LD: Dosis letal; LC: Concentración letal. SGA: Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos.; N° CAS: N° de registro Chemical Abstracts Service; N° CE: N° de registro en la Unión Europea. Valor Límite Permisible - Media Ponderada en el Tiempo (TLV-TWA) Valor Límite Permisible - Exposición de Corta Duración (TLV-STEL)
--------------------------------	---

Industrias Cachimayo S.A. considera que el contenido y las recomendaciones tienen por finalidad informar al usuario. Los datos consignados en la presente Ficha de Datos de Seguridad, fueron obtenidos de fuentes confiables. Sin embargo, se entregan sin garantía expresa o implícita respecto de su exactitud o corrección. Las opiniones expresadas en este formato son de profesionales capacitados y la información entregada es la conocida actualmente sobre la materia.

Considerando que el uso de esta información y del producto está fuera del control del Proveedor. La empresa Industrias Cachimayo S.A. no asume responsabilidad alguna por este concepto. El determinar las condiciones de uso seguro del producto es obligación del usuario.

Referencia:

- Guía destinada al uso de los primeros respondedores durante la fase inicial de un incidente en el transporte que involucre materiales peligrosos/mercancías peligrosas - 2024 Guía de respuesta ante una emergencia.
- Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos (SGA) Octava edición revisada Naciones Unidas 2021.
- Referencias
- Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas, decimotercera edición, preparadas por el Comité Expertos de las Naciones Unidas.
- Toxic and Hazardous, Industrial Chemicals Safety Manual. The International Technical Information Institute.
- Dossier de registro nitrato de amonio, European Chemicals Agency.