



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PROPUESTA DE GESTION DE RIESGOS CON FOCO EN MINIMIZACIÓN DE
LAS VARIABILIDADES DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANQUE
DE RELAVES DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INES DE COLLAHUASI**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

RODRIGO ANDRÉS BENAVIDES CASTRO

**PROFESOR GUÍA:
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LORETO BURGOS RODRIGUEZ
GERARDO DÍAZ RODENAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2020**

**RESÚMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO
ACADEMICO:** *Magíster en Gestión y Dirección de Empresas*
POR: Rodrigo Andrés Benavides Castro
FECHA. Enero/2020
PROFESOR GUÍA: Luis Zaviezo Schwartzman

PROPUESTA DE GESTION DE RIESGOS CON FOCO EN MINIMIZACIÓN DE LAS VARIABILIDADES DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INES DE COLLAHUASI

El actual trabajo de tesis entrega la propuesta de cambiar el proceso de construcción del muro del tranque de relaves, por uno con menor variabilidad, mayor seguridad para las personas y los activos, mejora en los costos de operación y con una posibilidad relevante de incorporar tecnología al servicio de los procesos operativos de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

El actual proceso de construcción del muro de relaves contiene una flota de equipos de transporte (8 CAEX) además de equipos de apoyo (motoniveladora, rodillo, bulldozer, excavadora) para las labores de compactación y esparcimiento de los materiales para desarrollar las distintas capas del muro, además de un equipo de topografía que debe hacer las tareas de marcación de cotas y controles de los avances en la construcción.

La propuesta incorpora el uso de camiones autónomos, que tiene un impacto importante en la dotación asociada a la construcción del muro y en los equipos de apoyo que tendrán los proyectos de ingeniería de modo de evitar las marcaciones topográficas, minimizando la interacción del equipo de geomensura con equipos mineros. Además, el proyecto contiene una mejora en la manera de controlar el avance del muro de relaves, a través de la incorporación del uso de drones para los levantamientos topográficos, reduciendo la interacción hombre máquina.

La propuesta es analizada del punto de vista del proceso, relevando las actividades actuales que tiene la forma de construcción del tranque, que genera una diferencia importante al utilizar tecnología autónoma. Se profundiza posteriormente en los beneficios del punto de vista de la gestión, donde se puede apreciar que la propuesta presenta menores riesgos para las personas, para los activos de la Compañía y minimiza la variabilidad del proceso.

Finalmente se desarrolla un análisis económico y los resultados presentan importantes beneficios económicos, donde se estima llegar a un ahorro en 5 años de operación, con la implementación de la tecnología AHS y además del uso de los drones en los controles topográficos de alrededor 13 MMUS\$.

Por último, se logran mejoras importantes en productividad ya que los valores de tonelada movida por persona suben de 207000 toneladas a 362000 toneladas en la construcción de tranque.

DEDICATORIA

A mi señora, Francisca Corvalan y mis hijos Roque Tomicic, Tomás y Antonia Benavides por su paciencia y apoyo durante estos dos años provechosos para mí pero que fueron de menos estar juntos físicamente.

Los Amo siempre

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	CONTEXTO DE LA COMPAÑÍA	1
1.2	PLAN MINERO DE COLLAHUASI	3
1.3	CONTEXTO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES	4
1.4	CICLO DE GESTIÓN DE RIESGOS DE COLLAHUASI	6
1.5	JUSTIFICACIÓN	8
2	OBJETIVOS	11
3	METODOLOGIA	11
3.1	DEFINICIÓN DE LA HIPÓTESIS	13
4	MARCO CONCEPTUAL	14
4.1	TECNOLOGÍAS AUTÓNOMAS	14
4.1.1	<i>Generalidades</i>	14
4.1.2	<i>Comparación de tecnología Komatsu vs Caterpillar</i>	17
4.1.3	<i>Tecnología Komatsu</i>	17
4.1.4	<i>Tecnología Caterpillar</i>	19
4.1.5	<i>Comparación de tecnologías</i>	20
4.2	TECNOLOGÍA EN EQUIPOS DE APOYO	24
4.3	CONTROL TOPOGRÁFICO	24
4.4	DEFINICIÓN DEL ASARCO DE COLLAHUASI	25
4.4.1	<i>Indicadores de Desempeño</i>	26
5	DESARROLLO	28
5.1	PLAN MINERO CONSIDERADO	28
5.2	ACTUAL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN	28
5.2.1	<i>Sistema de turnos utilizados en la construcción</i>	31
5.2.2	<i>Resumen de equipos y operadores</i>	32
5.2.3	<i>Sistema de crecimiento del muro de relaves</i>	33
5.3	ALTERNATIVA PROPUESTA	35

5.3.1	<i>Ajuste de operadores y equipos de la nueva propuesta</i>	38
6	EVALUACION DE LA PROPUESTA (PRODUCTIVIDAD, VARIABILIDAD DEL PROCESO, ANÁLISIS ECONÓMICO)	41
6.1	PRODUCTIVIDAD DE LA NUEVA PROPUESTA.....	41
6.2	VARIABILIDAD DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TRANQUE.....	41
6.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL USO DE TECNOLOGÍA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES.....	45
6.4	RIESGOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	47
6.4.1	<i>Cultural</i>	47
6.4.2	<i>Comunicación</i>	47
6.4.3	<i>Evaluación Preliminar</i>	47
6.4.4	<i>Riesgo de Cobertura del sistema autónomo</i>	48
7	CONCLUSIÓN	49
8	BIBLIOGRAFÍA	51
9	ANEXO	52
9.1	RESUMEN BUDGET 2019	52
9.2	EXTRACTO PLAN QUINQUENAL COLLAHUASI.....	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Calidad del Yacimiento	2
Figura 1-2 Ubicación geográfica.....	2
Figura 1-3 Cadena de Valor y áreas de apoyo en la línea inferior	4
Figura 1-4 Rajos Collahuasi y Tranque de Relaves	5
Figura 1-5 Puntos de Trabajo en la Construcción del Muro de Relaves	5
Figura 1-6 Impacto por Incidentes (variabilidad de los Procesos)	6
Figura 1-7 Clclo de Deming.....	7
Figura 1-8 Ciclo de Gestión de Riesgos Minera Collahuasi	7
Figura 1-9 Índice de Frecuencia (número de accidentes con tiempo perdido / millón de HH).....	8
Figura 1-10 Productividad (kton Cu / FTE).....	9
Figura 1-11 Ausentismo (%).....	9
Figura 1-12 Confiabilidad de sistemas	10
Figura 4-1 Evolución Operación Autónoma (Fuente XV Congreso internacional Expomin 2018).....	15
Figura 4-2 Sistema de operación de equipos autónomos	16
Figura 4-3 Diagrama representativo de burbuja de seguridad Sistema Komatsu .	18
Figura 4-4 Diagrama representativo de burbuja de seguridad Sistema Caterpillar	19
Figura 4-5 Sistema de DRONE para levantamiento Topográfico en Altura.....	24
Figura 5-1 Modelo de Proceso Actual - Construcción Muro de Relaves	28
Figura 5-2 Circuitos de Tránsito de Camiones	29
Figura 5-3 Muro del Tranque: Berma, Espaldón, Coronamiento y Transición.....	30
Figura 5-4 Estacado Necesario para el Control de Cotas	31
Figura 5-5 Altura de Muro de Relaves 2017: 70 metros.....	33
Figura 5-6 Revancha que Tiene Relave vs Altura Muro.....	34
Figura 5-7 Método Crecimiento Muro Agua Abajo	35
Figura 5-8 Modelo de Nuevo del Proceso - Construcción Muro de Relaves	37
Figura 6-1 Comparación de Actual versus Nuevo Proceso Constructivo	42

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Comparativa tecnologías Komatsu vs Caterpillar.....	22
Tabla 4-2: ASARCO Collahuasi	25
Tabla 5-1: Equipos Para la Construcción del Muro de Relaves	32
Tabla 5-2: Operadores necesarios para el Tranque de Relaves.....	32
Tabla 5-3: Nueva Flota Para la Construcción del Muro de Relaves	39
Tabla 5-4 Operadores en tranque de relaves bajo la nueva metodología de construcción	39
Tabla 6-1: Matriz de Riesgos - Evalúa actual versus nuevo proceso Constructivo	44
Tabla 6-2: Tabla de Variación de Utilización y Disponibilidad de Caex (Tripulados vs AHS).....	45
Tabla 6-3: Resultados de Ahorro por la implementación de la nueva propuesta de construcción del Muros de Relaves.....	46

1 INTRODUCCIÓN

Chile se ha destacado hace bastante tiempo en la producción de cobre a nivel mundial, produciendo alrededor de un tercio de lo consumido en el mundo, lo que implica tener una alta relevancia en la satisfacción de la demanda de este commodity. Esto se refleja además en las reservas estimadas a explotarse en los próximos años, lo que hace anticipar que la producción de este mineral seguirá siendo muy relevante en el mediano y corto plazo. Las inversiones en carpeta para el periodo 2016 al 2025 están alrededor de los US\$50.000 millones. Lo anterior sumado a que de manera directa la minería hoy representa más del 10% de PIB de nuestro país y más del 50% de las exportaciones siendo el principal receptor de inversión extranjera directa.

Por otra parte, la información respecto las proyecciones de consumo de este commodity no dan señales que esto vaya a la baja, más bien al contrario, la demanda supone que subirá considerando que el mundo para su desarrollo continuará usando cobre y posiblemente se intensifique el uso de este mineral con la proyección de construcción de autos eléctricos, sabiendo que varias firmas han ido en la línea que se menciona.

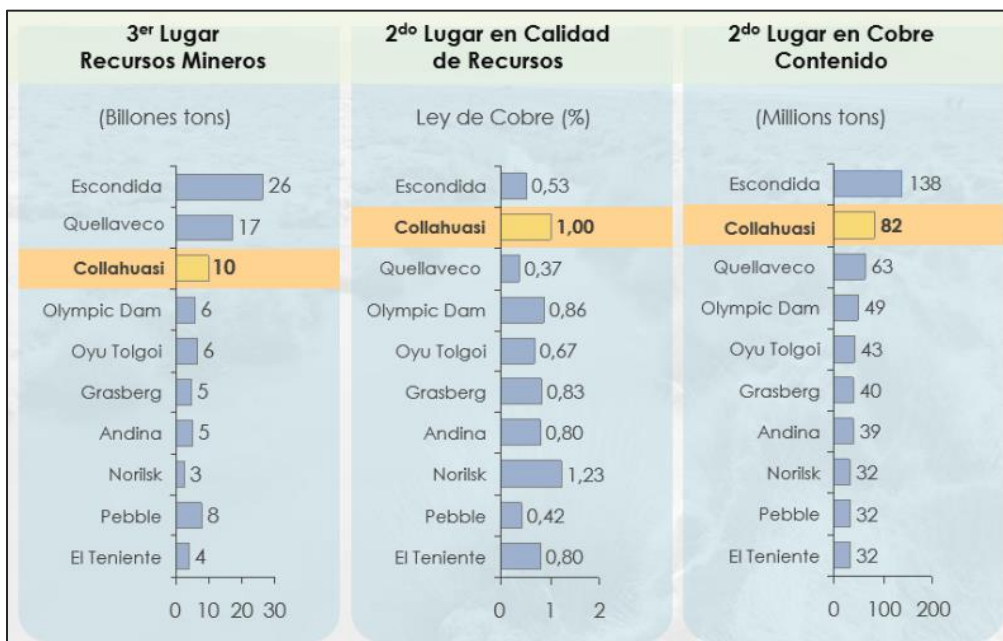
Por las razones antes expuestas, la industria minera en Chile sigue trabajando en mantener esta industria en una buena posición de competitividad, aumentando sus producciones en la medida de lo posible, generando estrategias de mejorar la productividad de sus faenas, bajando los costos de operación y minimizando la variabilidad de sus procesos, con el fin de tener una industria más sustentable y competitiva en el largo y mediano plazo.

1.1 Contexto de la Compañía

Collahuasi es una Compañía Minera dedicada a la extracción y producción de concentrado y cátodos de cobre, y concentrado de molibdeno. En diciembre de 2016 Collahuasi era la segunda mayor operación de cobre en el mundo y uno de los mayores depósitos de recursos minerales de cobre del planeta (9.964 millones de toneladas).

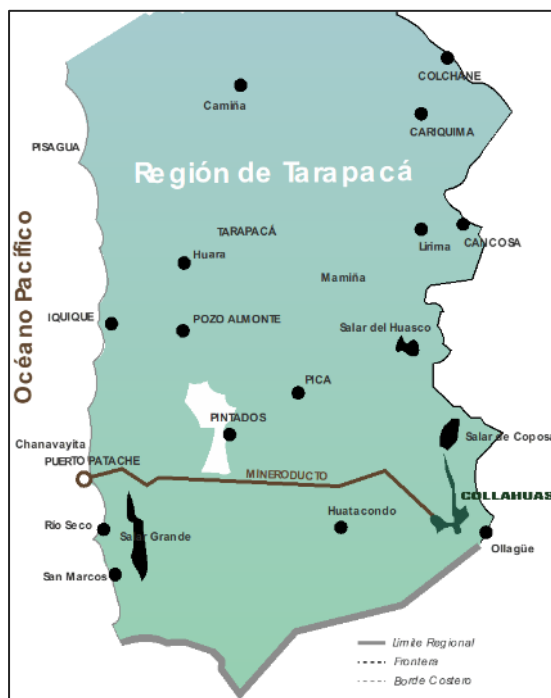
En la figura 1 se presenta una tabla descriptiva que indica la calidad del yacimiento, referida a su evaluación mundial durante el 2017, esto con el fin de lograr dimensionar la importancia, a nivel mundial, del yacimiento que tenemos para generar una propuesta de valor significativa y que sea interesante a considerar.

Figura 1-1 Calidad del Yacimiento



Fuente: WM, 2017. Analysis: 1st Quartile Mining

Figura 1-2 Ubicación geográfica



Sus instalaciones industriales y los yacimientos Rosario, Ujina y Huinquentipa, ubicados en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, conforman el Área Cordillera. En el sector de Ujina se encuentra también la planta concentradora, desde donde nace un sistema de mineroductos de 203 km de extensión, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado hasta el Terminal Marítimo Collahuasi. Desde este recinto, ubicado en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, se embarcan los productos hacia los mercados internacionales. En este lugar, se encuentran también las plantas de molibdeno y de filtrado de concentrado.

Los accionistas son Anglo American plc (44%), Glencore (44%) y Japan Collahuasi Resources B.V. (12%), los que están representados en su Directorio.

El 2017 Collahuasi produjo 524,0 mil toneladas de cobre fino, con un costo promedio año de C1 de 1.14 us\$/lb.

Para la Compañía la sustentabilidad constituye el eje central y marco rector de su actuar y aplica a todos los niveles de la organización: personas, proyectos, operaciones, instalaciones y productos.

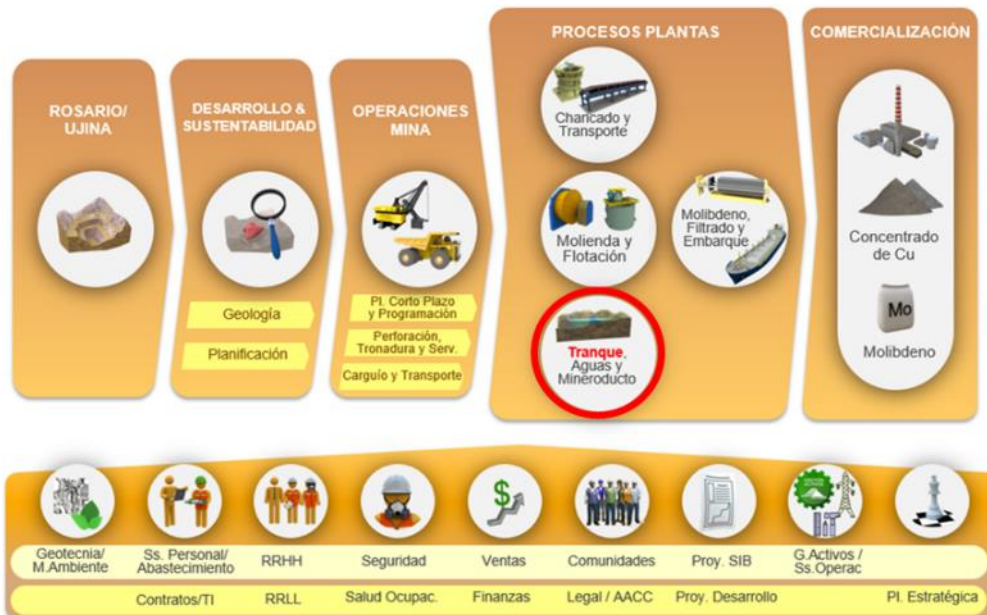
Es pertinente indicar que la Compañía ve como un desafío, mantenerse como una faena importante en la contribución del desarrollo del país, y en esa línea es que tiene como foco de su gestión lograr una cadena de valor que sea sustentable en el tiempo cuidando a las personas y minimizando las variabilidades de sus procesos para ser eficientes, manteniendo la contribución al desarrollo de nuestra industria.

1.2 Plan minero de Collahuasi

Hoy en día la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi tiene un plan minero que tiene por vida, entendiendo esto como la duración del proyecto minero donde terminará la explotación de los recursos hoy conocidos, hasta el año 2081, plan minero que involucra contener los relaves producto del procesamiento de los minerales que tiene el yacimiento.

La cadena de valor presentada a continuación muestra los distintos procesos involucrados en Collahuasi para la obtención del concentrado de cobre. Partiendo por indicar los dos rajos que hoy en día existen Rosario y Ujina, uno activo a la fecha (Rosario), el que es explotado en la secuencia entregada por planificación de largo plazo y operado por la vicepresidencia de operaciones mina que entrega los minerales en la cantidad y calidad requerida a la planta de procesamiento de minerales donde además de procesar y generar el concentrado de cobre, en paralelo se disponen los relaves en el tranque de relaves que será objeto de análisis en este documento, específicamente el muro que sostiene los relaves de esta compañía. Los tonelajes y movimientos por año, involucrados en la construcción del muro pueden ser revisados en el anexo “Extracto plan minero quinquenal Collahuasi 2020”).

Figura 1-3 Cadena de Valor y áreas de apoyo en la línea inferior



Dentro de la cadena presentada encontramos el foco de trabajo que proponemos analizar, este corresponde al tranque que se encuentra dentro de la vicepresidencia de operaciones planta y continuación se realizará una descripción de su operación.

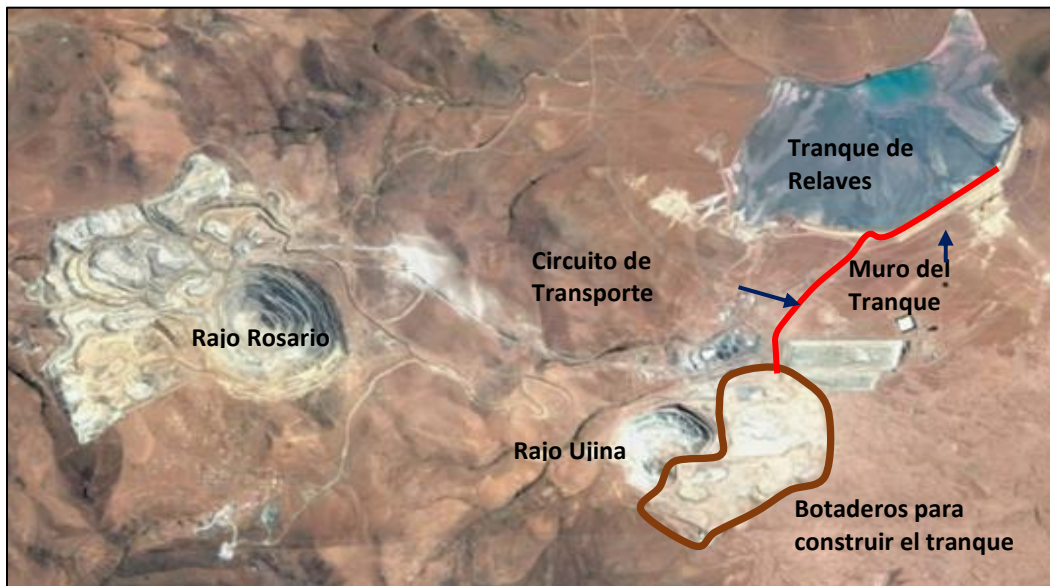
1.3 Contexto de la construcción del tranque de Relaves

El tranque de relaves de la Compañía, específicamente la manera de construirlo es el foco del análisis que se desarrolla en este documento, todas las variables que influyen en su crecimiento, referido específicamente a los activos involucrados y la manera en que hoy los gestionamos, administramos, pasando por el actual sistema de control que utilizamos y las personas involucradas en las labores de operación del tranque de relaves será parte del análisis.

El tranque de relaves de la Compañía está ubicado cerca del primer rajo que se tuvo en explotación, que corresponde al Rajo Ujina, que tiene sus botaderos de lastre al lado y son el material de base seleccionado para la construcción del muro de relaves del tranque (ver ilustración 4).

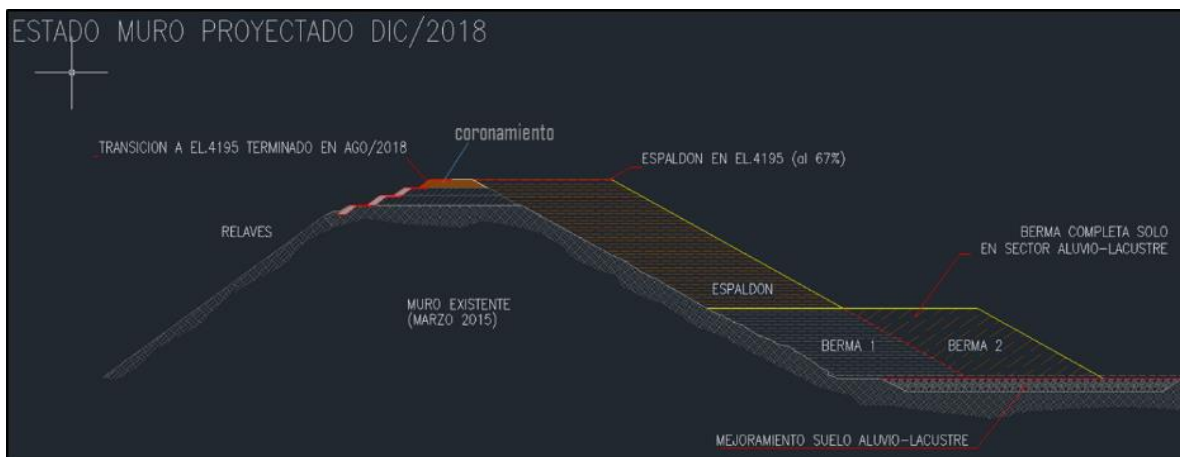
En la ilustración indicada se presenta además los circuitos utilizados en el transporte de materiales que queremos gestionar, pensando que es un circuito aislado de la actual operación minera. Ya que el rajo Ujina, de donde se sacan los materiales de construcción está detenido por varios años debido a las calidades no competitivas con el rajo de Rosario que si sigue operando.

Figura 1-4 Rajos Collahuasi y Tranque de Relaves



El tranque de relaves hoy en día es construido por partes en una secuencia establecida donde tenemos los siguientes puntos de trabajo: Espaldón, coronamiento, transición y berma.

Figura 1-5 Puntos de Trabajo en la Construcción del Muro de Relaves



Para el desarrollo se utilizan camiones mineros que llevan el material desde el botadero de Ujina y material empréstito para desarrollar estas zonas de trabajo mencionadas. El carguío se realiza mediante una pala hidráulica que carga los materiales desde los botaderos de Ujina y los camiones transportan este material y lo dejan en los distintos sectores, donde existen equipos de apoyo (bulldozer, motoniveladoras, excavadoras y rodillos) que van regularizando, compactando material para cumplir con las exigencias constructivas.

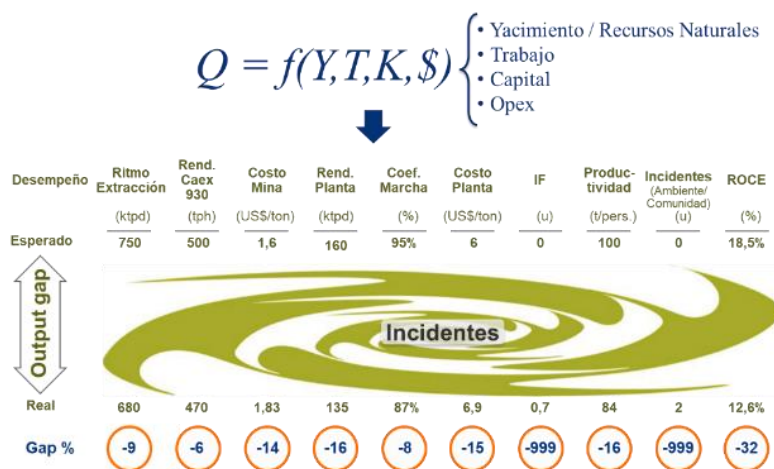
Este sector es aislado de todas las operaciones mineras, ya que se encuentra alejado del actual rajo en operación, lo que presentan una oportunidad interesante de evaluar de una manera distinta, analizarla como una prueba de operación diferente a la metodología utilizada en el rajo rosario, por otra parte, todos estos equipos son operados por personal propio, que tal como cualquier persona tienen vacaciones, se enferman, sufren de somnolencia, desconcentraciones, almuerzan, cuestiones que también hacen poner un foco de análisis para visualizar alternativas distintas de operación.

1.4 Ciclo de Gestión de Riesgos de Collahuasi

Gran parte de la depredación de valor en las Compañías sucede por las pérdidas no planificadas por la propia variabilidad de los procesos, al no estar totalmente controlados bajo un correcto ciclo que sea capaz de gestionar los riesgos. En Collahuasi este hecho no es ajeno y entendemos que una correcta gestión de riesgos en la etapa de planificación de cualquier proceso debiese dar los resultados esperados.

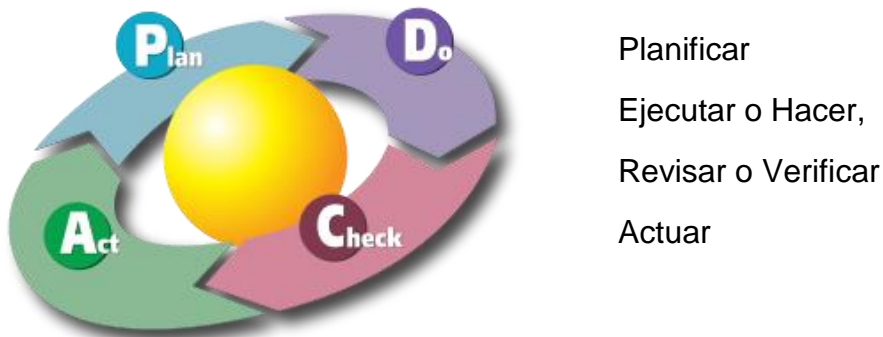
Como en cualquier compañía minera un foco relevante es el de maximizar la función de beneficios para los dueños, y el efecto de las desviaciones producto de los incidentes son una manera de impactar los beneficios, a continuación, se presenta un efecto negativo a raíz de los incidentes en los procesos que afectan la Compañía, la cuantificación de ellos se observa en la siguiente imagen:

Figura 1-6 Impacto por Incidentes (variabilidad de los Procesos)



Collahuasi hoy en día tiene la tarea de minimizar el efecto presentado anteriormente, y una forma de trabajar que pretende minimizar esta variabilidad es a través de un ciclo implementado por Deming, conocido como espiral de mejora continua, que no es más que una estrategia de mejora continua en cuatro pasos fundamentales que corresponde a:

Figura 1-7 Ciclo de Deming



Y esto ha sido tomado como una referencia fundamental para generar nuestro propio ciclo interno de trabajo, el que además incluye una etapa de aprendizaje, comunicación y gestión del conocimiento.

Figura 1-8 Ciclo de Gestión de Riesgos Minera Collahuasi

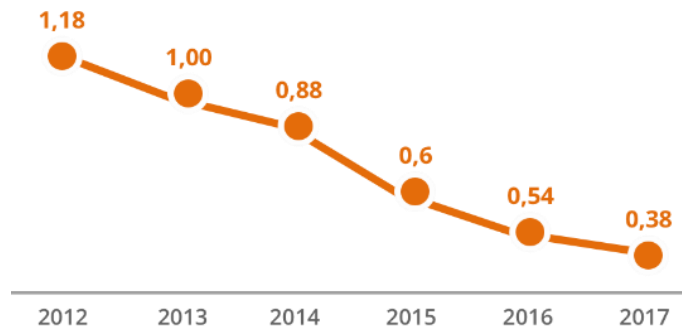


1.5 Justificación

Basado en el ciclo anteriormente presentado, se mueve toda la Compañía, intentando minimizar la variabilidad de los procesos productivos en cada una de las etapas de la cadena de valor. Esto es: mapeando los procesos, levantando los riesgos y evaluando su impacto, generando controles para mitigar su efecto y luego de esto recién ejecutar las tareas y verificar que los controles se estén ejecutando, de no ser así corregir y si se encuentra una mejora en el proceso, utilizarla corrigiendo nuevamente la forma de hacer el proceso y generando la mejora continua.

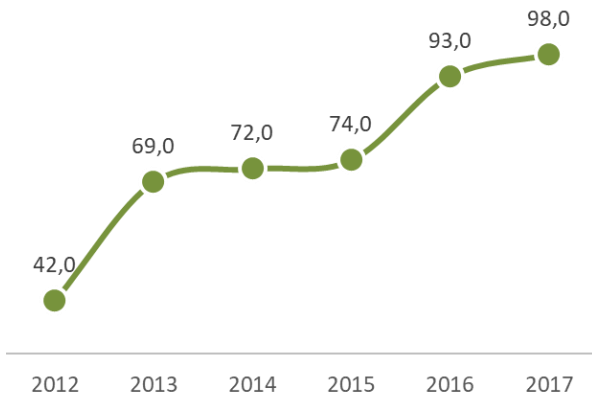
Por otro lado, un punto también importante para justificar el trabajo a desarrollar es la relevancia que ha tenido la Compañía en la gestión en el cuidado de las personas o trabajadores de la Compañía.

*Figura 1-9 Índice de Frecuencia
(número de accidentes con tiempo perdido / millón de HH)*



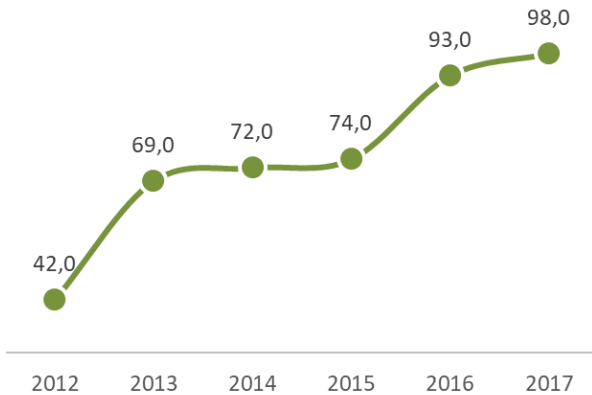
Sumado a todo lo anterior, los focos de la industria también son un norte de trabajo dentro de Collahuasi, la productividad no está ajena a parte de las responsabilidades asumidas por el equipo directivo y su gestión se puede observar en el siguiente gráfico:

Figura 1-10 Productividad
(kton Cu / FTE)



Este gráfico muestra claramente la gestión desarrollada los últimos 6 años apuntando a mejorar la productividad medida por la cantidad de cobre fino en kton por persona

Figura 1-11 Ausentismo
(%)



Por otro lado, el ausentismo también es una preocupación, y también se han logrado mejoras considerando este indicador.

Expuesto lo anterior quedan dos puntos relevantes que hacen fuerza para la justificación de desarrollar un proceso que presente menor variabilidad, menores riesgos a las personas y que además golpee a la productividad de la Compañía.

Figura 1-12 Confiabilidad de sistemas



Los gráficos presentan la confiabilidad de los sistemas, ya no solo es importante que el equipo esté disponible, si no que hablar de confiabilidad de los sistemas se hace mucho más interesante, ya que nos da una certeza que los equipos estarán disponibles, cuando se necesitan, en el momento que debemos sacarle provecho al activo.

Finalmente, el uso de nueva tecnología en nuestros procesos también se observa como un punto a favor de hacer una empresa con ventajas competitivas, tal como lo ha presentado el presidente ejecutivo en varias exposiciones que relevan que el futuro en la industria debe incorporar esta herramienta.

De todo lo indicado, es fácil deducir que la propuesta de incorporar la autonomía de camiones mineros en la construcción del tranque de relaves debiese impactar de manera positiva en los indicadores que se han presentado, maximizando productividad, generando menos riesgos a las personas y activos, mejorando la confiabilidad del sistema completo y obteniendo un proceso con menores variabilidades y más asertivo en sus metas definidas.

2 OBJETIVOS

Propuesta de modelo de gestión destinado a impactar la variabilidad del proceso de construcción del tranque de relaves y mejorar la gestión de riesgos asociada en este trabajo.

3 METODOLOGIA

Revisión de las tecnologías existentes en el mercado, respecto CAEX autónomos, analizando los distintos proveedores y sus productos posibles de utilizar en la construcción del muro del tranque de relaves.

El punto anterior incluye una mirada tanto a los camiones de alto tonelaje en conjunto con el equipo de carguío asociado, como también a todos los equipos de apoyo que participan de la construcción del muro de relaves, incluyendo además la opción de usar tecnología en el control de la construcción, por ejemplo, Drones para el control topográfico.

Revisadas las tecnologías se define la más adecuada para implementar en la faena, observando los beneficios, ventajas, desventajas de cada una de ellas.

Posteriormente se desarrolla el modelo de operación a implementar en la construcción del muro utilizando las tecnologías definidas.

La medición del nuevo sistema será de manera estimada, ya que el proyecto implementado, por los tiempos que requiere para su desarrollo e implementación no será alcance de la tesis, la medición entonces se desarrollará con una comparación del actual modo de operación con respecto a la nueva propuesta utilizando esta nueva tecnología.

Este análisis también incluye una perspectiva de los riesgos que implica el uso de la tecnología al servicio de la construcción del muro de relaves, por lo que se evaluará mediante una matriz de probabilidad y consecuencia la efectividad que tiene el uso de tecnología, cambiando el proceso de construcción del muro, y así evaluar la efectividad en el logro de minimizar la variabilidad del proceso constructivo.

Los puntos de comparación serán los siguientes:

- Productividad del sistema
- Variabilidad del proceso constructivo del tranque
- Evaluación económica estimada de los beneficios de un sistema y otro.

En detalle para clarificar el alcance de la propuesta en los puntos anteriormente mencionados será:

Los beneficios del modelo serán medidos evaluando el actual sistema utilizado versus la nueva propuesta, mediante matrices que nos ayuden a visualizar las diferencias que tiene la actual metodología de trabajo en el tranque versus el nuevo proceso, comparando los puntos siguientes:

Productividad: medida en toneladas movidas por periodo de la flota de trabajo, la productividad medida en toneladas movidas por persona.

La variabilidad del proceso constructivo: observando cada etapa constructiva pasando por el carguío de material, transporte y depositación, trabajo de los equipos de apoyo en la operación y construcción del muro (compactación) y los sistemas de control topográfico y control de flota de transporte. Este punto será desarrollado comparando la actual metodología constructiva versus la nueva propuesta usando tecnología y también será medida mediante una matriz de probabilidad y consecuencia de ambos métodos constructivos, el primero, la actual metodología versus la nueva propuesta con uso de tecnología autónoma.

Evaluación económica: se desarrolla una evaluación económica del actual sistema y la nueva alternativa para obtener el menor gasto asociado a la construcción del muro. Esto será considerando las metas y movimiento de material considerados en el plan quinquenal de la Compañía.

Esta evaluación económica será desarrollada con datos entregados por la empresa que se designe, como la que entrega mayor certeza y confianza en la incorporación de la tecnología autónoma y con estos datos lograremos cuantificar el beneficio económico de incorporar los camiones autónomos a nuestro proceso.

Es importante relevar que se espera lograr ahorros en con la nueva propuesta de trabajo en conjunto con un menor riesgo y la minimización de la variabilidad del proceso constructivo, objetivos de gestión que la Compañía relewa en los puntos anteriores y que nos hace pensar que puede ser una buena propuesta para implementar a futuro.

Finalmente, se entrega una recomendación a la Compañía respecto la posibilidad de incorporar, como alternativa a desarrollar en el proceso constructivo del tranque de relaves, la propuesta de usar nueva tecnología y los posibles beneficios que se deriven de tener este nuevo proceso constructivo relevando las ventajas del sistema propuesto, evaluando la variabilidad del sistema y entregando una estimación preliminar de los beneficios económicos que pudiesen darse.

3.1 Definición de la hipótesis

Se ha descrito el contexto de la Compañía, el ciclo de gestión de riesgos que gobierna los distintos procesos y los focos que ha desarrollado Collahuasi a lo largo de los últimos años, presentados en la justificación de la propuesta que tiene el presente documento.

Es conveniente entonces destacar un pequeño resumen de los focos a perseguir como proyecto, para que la propuesta a entregar como alternativa de desarrollo se logre visualizar como una idea interesante y que ayude a esta empresa a mantenerse como una Compañía que logre navegar en las actuales exigencias de la industria.

Los siguientes son los focos a perseguir, que van en directa relación a la manera de hacer las cosas que tiene la Compañía:

- Cuidado de las personas, mejora en los índices de accidentabilidad de la Compañía.
- Cuidado de los activos.
- Mejorar la productividad de los procesos.
- Mejorar los costos.
- Mejorar la productividad de la Compañía.
- Aumento de la confiabilidad de los activos y los procesos.
- Minimización de la variabilidad de los procesos.

En general buscar lograr un soporte a cada uno de los puntos relevados en la lista anterior, nos hará tener una propuesta que sea consistente con la gestión que busca la Compañía, de esta manera la hipótesis que sostiene este trabajo es:

El uso de tecnología como lo son los camiones autónomos y la evaluación de usar otros equipos de apoyo con sistemas inteligentes de control del proyecto podrán entregarnos beneficios que hoy no los da la actual metodología de construcción del muro de relaves.

Este nuevo sistema o proceso de construcción deberá aportar en la variabilidad del proceso, con mayor seguridad para las personas y los activos y mejorará la productividad del sistema.

La idea de incorporar tecnología será con el fin de poder lograr obtener un proceso constructivo que golpee de manera positiva a los focos mencionados anteriormente, por lo que esta propuesta busca mejorar el proceso de construcción de tranque de relaves haciéndolo más confiable, rentable y seguro para las personas y los activos de la Compañía.

4 MARCO CONCEPTUAL

4.1 Tecnologías Autónomas

4.1.1 Generalidades

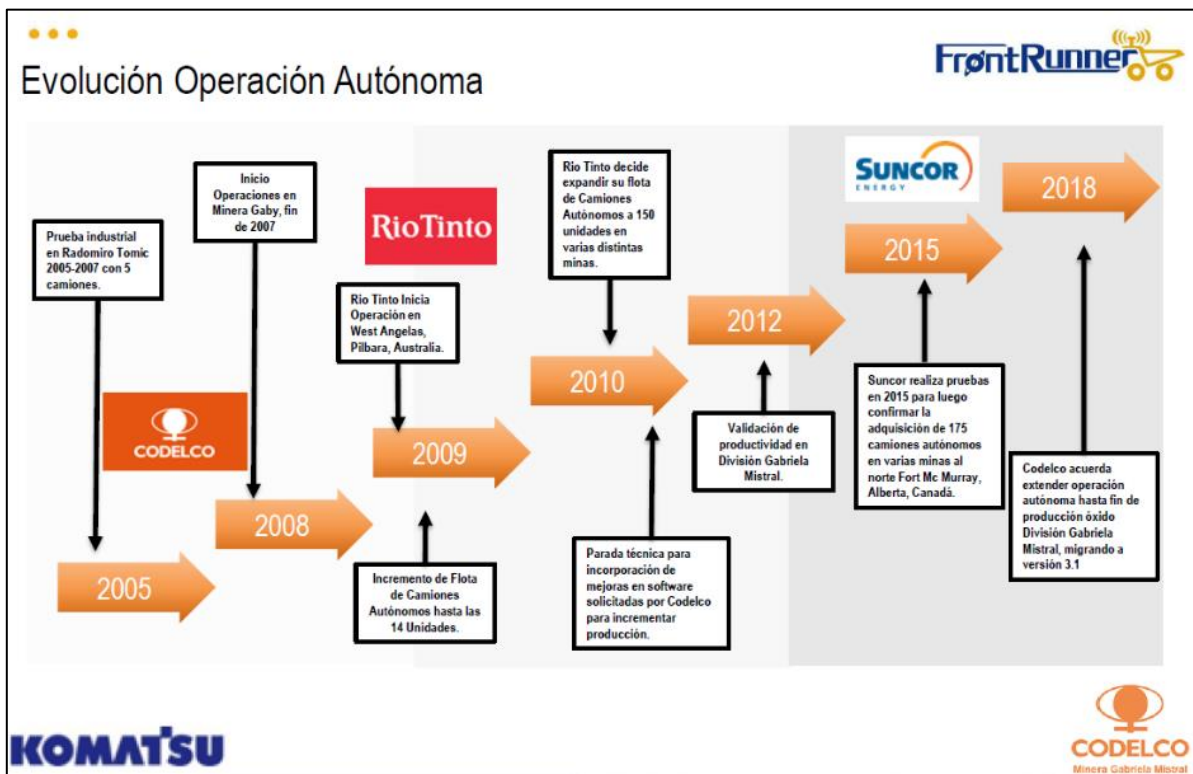
Durante el último tiempo, el interés en la automatización se ha vuelto más importante en la industria minera, tanto en la minería de superficie como en la minería subterránea. La industria, en particular las empresas de primer nivel, están evaluando el uso de tecnologías autónomas para mejorar el desempeño en seguridad y rentabilidad a través de la productividad y aumento de eficacia del trabajo. A su vez los proveedores han visto esta necesidad y se han centrado en el desarrollo de sistemas de minería automatizados para estar alineados a las necesidades del mercado.

En teoría la automatización de un proceso en particular, conduce a un mayor control del proceso mediante la reducción de la variabilidad de éste. La idea de automatizar la minería ha seguido a la industria manufacturera con la adopción de los principios de Lean Manufacturing. La industria manufacturera ha demostrado con éxito que a través de la automatización de particulares procesos, se pueden lograr mejoras en eficiencia y calidad. Sin embargo, para que la automatización sea implementada con éxito, se requieren cambios en los procesos mineros, personas y cultura operacional. Sin el alineamiento de las personas y el apoyo a los procesos con la tecnología, los beneficios de la automatización pueden verse comprometidos. Cuestión que Collahuasi lo cree firmemente y entiende que todo cambio deberá partir por las personas, luego los procesos para finalmente ser implementados de manera operativa.

Continuando en la línea de potenciar el uso de tecnología, los sistemas automatizados de transportes (AHS) se han venido desarrollando desde la década de los 80', lo que se ha traducido hoy en día en una técnica madura y que es manejada por varias empresas del rubro minero en todo el mundo, entre las que encontramos (ver ilustración 13):

- Codelco
- Rio Tinto
- Suncor Energy

Figura 4-1 Evolución Operación Autónoma (Fuente XV Congreso internacional Expomin 2018)



Con las experiencias antes mencionadas, es conveniente clarificar que es lo que entendemos como sistemas autónomos de transporte para fines de comprensión de la tesis:

Un sistema AHS en el sentido más estricto de la palabra, es un sistema autónomo no requiere ningún tipo de supervisión humana o input directo. En cambio, un sistema automatizado requiere de alguna forma de supervisión humana para que ésta funcione. Ambos sistemas, autónomo y automatizado reducen los requerimientos de personal y si está bien diseñado hará que el proceso sea más previsible, coherente y de mayor calidad. Los diferentes niveles de implementación tecnológica se definen específicamente como:

- Mecanizado: equipado con máquinas
- Sistema Automatizado: reemplazo de trabajadores por máquinas (requieren supervisión humana)
- Sistema Autónomo: independiente de supervisión humana

Los sistemas actuales de transporte autónomos, que son los utilizados en la industria minera, son esencialmente camiones sin conductor que navegan según trayectorias GPS predefinidas y que son controlados por un sistema de control informático. El sistema informático, que puede ser un sistema como el despacho o alguno similar, requiere control humano y supervisión para poder funcionar. Es por tanto un sistema automatizado y no estrictamente autónomo. AHS es un exitoso sistema automatizado que realiza todas las acciones previamente ejecutadas en un sistema de transporte convencional.

Figura 4-2 Sistema de operación de equipos autónomos



En la práctica lo que se necesita para operar bajo un sistema autónomo con un sistema de cobertura GPS, que nos indique la ubicación espacial del equipo autónomo en todo momento, evitando por sobre todo las pérdidas de cobertura del sistema, por lo que debe ser un sistema robusto que entregue confiabilidad de la ubicación en todo momento y con un nivel de exactitud que llegue al cm.

Es conveniente además indicar que las tecnologías hoy en día más utilizadas corresponden a las que presentan Caterpillar y Komatsu, que serán analizadas brevemente con el fin de definir la que utilizaremos como parte del desarrollo del análisis que se presenta en este trabajo.

4.1.2 Comparación de tecnología Komatsu vs Caterpillar

Las características de cada una de las tecnologías se describen a continuación realizando además una comparación entre ellas.

4.1.3 Tecnología Komatsu

La solución autónoma de transporte Komatsu hasta el momento ha desarrollado dos modelos de su gama de equipos, estos son el modelo 830E-AT, 930E-4 AT y el 930E-4SE. Estos modelos están equipados con una serie de componentes a bordo que permiten la navegación autónoma.

El software controlador del sistema Komatsu, llamado FrontRunner, es un sistema de control de gran escala que permite una operación segura y eficiente entre una flota de camiones de alto tonelaje autónomos, equipos de accionamiento manual (unidades de carga, bulldozer, motoniveladoras, etc.) y equipos livianos (camionetas).

Por razones de seguridad, los equipos en el sistema operan en un circuito aislado de producción, llamado Área Autónoma (AT). Todo el equipo de operadores que trabajan en el área de AT está especialmente capacitado para trabajar con AHT.

El sistema utiliza tecnologías de última generación en software de supervisión, comunicaciones inalámbricas, GPS de alta precisión, detección de obstáculos, y de control de navegación para dirigir continuamente a los AHT a puntos de carga y descarga.

El sistema está gestionado por un controlador central mediante un único monitor situado en la sala de control (Despacho o Similar). El controlador utiliza el software para establecer los lugares de carguío y vaciado de los AHT, restricciones de velocidad, condiciones de los caminos, rutas de vaciado en botaderos, stocks y otras variables. El software de supervisión se ejecuta en computador central, el cual controla el movimiento de los AHT basado en la configuración y lugar de acuatamiento creado por los operadores de equipos de carguío.

El software cuenta con una gráfica interactiva en tiempo real que representa el área autónoma (AT). Esta muestra la red de caminos, lugares, las posiciones y estados de AHT y equipos tripulados. El controlador utiliza la pantalla para seguir de cerca la operación en el AT y supervisar el funcionamiento de todos los equipos registrados en el sistema. El controlador central también está siempre en contacto por radio con los operadores de equipos de carguío y equipos auxiliares para confirmar toda la actividad.

El controlador puede detener en cualquier momento a los AHT, pulsando la parada de emergencia que está ubicado en la sala de control. Adicionalmente los equipos

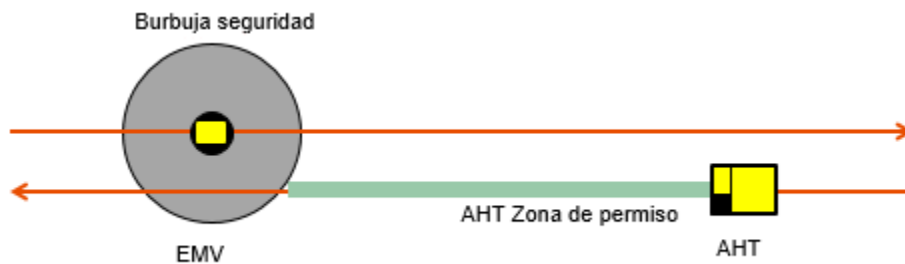
también pueden ser detenidos en terreno a través del botón de parada de emergencia ubicado en cada uno de los equipos.

En términos de seguridad, el software de supervisión proporciona continuamente múltiples verificaciones cruzadas para asegurar la operación más segura posible. Especial atención en las actividades de interacción entre equipos autónomos y operados manualmente, las que incluyen capas redundantes de seguridad, tales como detección de obstáculos y el sistema de detección de colisiones.

4.1.3.1 Lógica de Sistema de seguridad

La lógica del sistema Komatsu considera una burbuja virtual de protección de 50 metros alrededor de cada uno de los equipos en el área autónoma (autónomos y manuales). Esto con la finalidad de disminuir los riesgos asociados a potenciales colisiones entre los equipos. Por ejemplo, en la situación que se muestra en la figura a continuación, que muestra un AHT transitando en dirección opuesta a un equipo operado manualmente (EMV), el camión disminuirá su velocidad a 30 km/hr cuando pase al lado del EMV ya que el camión identifica al equipo y activa el protocolo de paso con vehículos en modo manual y disminuirá su velocidad.

Figura 4-3 Diagrama representativo de burbuja de seguridad Sistema Komatsu



4.1.4 Tecnología Caterpillar

Al considerar la solución autónoma de transporte Caterpillar, podemos considerar que hasta el momento ha desarrollado dos modelos de su gama de equipos, estos son los camiones 793F AT y 797F AT. Operacionalmente sólo ha sido evaluado el modelo 793F AT. Estos modelos están equipados con una serie de componentes a bordo que permiten la navegación autónoma.

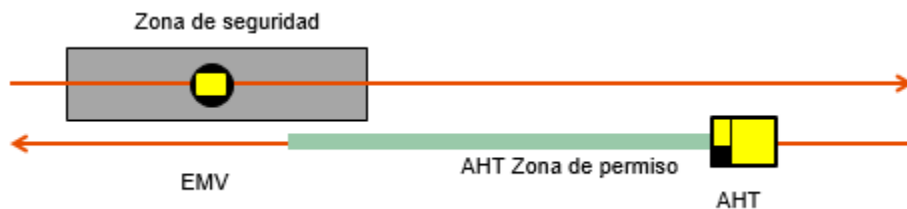
4.1.4.1 Sistema de supervisión (Command)

El software controlador del sistema Caterpillar, llamado Command, es un sistema de control de gran escala que permite una operación segura y eficiente entre una flota de camiones de alto tonelaje autónomos, equipos de accionamiento manual (unidades de carga, bulldozers, motoniveladoras, etc.) y equipos livianos (camionetas).

4.1.4.2 Lógica de Sistema de seguridad

La lógica del sistema Caterpillar considera una zona de seguridad para cada uno de los equipos en el área autónoma (manuales y autónomos). Las dimensiones mínimas del área de transporte corresponden a 1.7 veces el ancho del equipo (aproximadamente 17 m para un camión 797F AT). Cualquier equipo u objeto fuera de esta zona de seguridad no influye en el comportamiento del camión. Por ejemplo: en la situación que se muestra en la figura a continuación, la cual muestra un AHT transitando en dirección opuesta a un equipo operador manualmente (EMV), el camión no disminuirá su velocidad cuando pase al lado del EMV y seguirá su curso normal ya que el sistema asume que no existe riesgo de colisión.

Figura 4-4 Diagrama representativo de burbuja de seguridad Sistema Caterpillar



4.1.5 Comparación de tecnologías

En términos generales, los fundamentos del diseño de las tecnologías Komatsu y Caterpillar son similares, utilizando computadores y componentes específicos para replicar la habilidad humana de conducir un camión: razonamiento, percepción y accionamiento. Esto lo realiza a través de un sistema de supervisión (FrontRunner/Command), una red de comunicaciones, ruta virtual de caminos y sistemas a bordo del equipo.

Los '*drivers de valor*' de una operación autónoma son logrados con tiempo de ciclo eficientes y una mayor utilización efectiva. Ambos sistemas eliminan demoras asociadas a los operadores (colación, cambio de turno, etc). Un factor diferenciador son las demoras específicas asociada al sistema autónomo, las cuales son influenciadas en si por la tecnología, procesos operacionales y la lógica del sistema.

La tecnología Komatsu tiene mayor madurez en implementaciones operacionales, alcanzando alrededor de 10 años con su modelo 930E-4 AT. Además, ha desarrollado una postura más conservadora en cuanto a implementaciones, actualizaciones de software, hardware y diseño del sistema. En cambio, la tecnología Caterpillar ha tenido una rápida tasa de crecimiento los últimos 2 años, con implementaciones de su modelo 793F AT en dos operaciones Jimblebar (BHPBilliton) y Solomon (FMG).

4.1.5.1 Modelos operando

En Komatsu a la fecha existen tres modelos de su línea de equipos que pueden ser autónomos, los modelos 830E-AT, 930E-4 AT y el 930E-4SE los cuales se encuentran operando en faenas mineras. es importante considerar el modelo 930E 4SE, el cual presenta un motor de mayor potencia, y competiría fuertemente con lograr un lugar como una opción muy adecuada.

Caterpillar ha desarrollado los modelos 793F y 797F, aunque solo el primero ha sido desplegado en una operación minera, el otro modelo aún no ha sido testeado en un entorno operacional.

4.1.5.2 Sistemas expertos de supervisión

Los sistemas de supervisión de ambas tecnologías autónomas cumplen funciones similares de administración de las actividades en el área autónoma. Un factor diferenciador a favor de Caterpillar, tiene relación con su alta capacidad de integración y versatilidad con la suite de productos MineStar (Terrain, Detect, Fleet y Health). Komatsu, en cambio solo posee integración de la versión 3 FrontRunner con Dispatch versión 6.

4.1.5.3 Número de equipos operativos

En cuanto a la capacidad de equipos que soporta pueden interactuar en un sistema autónomo, la tecnología Caterpillar muestra ventajas sobre Komatsu, ya que el sistema no tiene limitaciones en cuanto al número de equipos, en cambio el sistema Komatsu tiene restricciones en su tecnología ya que la versión 2 tiene capacidad de 30 equipos y la versión 3 soporta 63 equipos.

4.1.5.4 Detección de objetos

Otra diferencia se observa en el sistema de detección de objetos del camión, ya que Komatsu combina tecnología de radar-láser y Caterpillar tecnología lidar. La diferencia entre ambos sistemas radica en que el sistema lidar tiene mayor capacidad de detección de objetos y sensible a las condiciones ambientales que el radar, por lo tanto, eventualmente se generaría mayor cantidad de falsos positivos (ejemplo niebla y polvo) y aumentaría las detenciones de la flota autónoma asociada a esta demora específica del sistema AHS.

La siguiente tabla muestra un resumen de las variables más importantes a tener en consideración de ambas tecnologías.

Tabla 4-1 Comparativa tecnologías Komatsu vs Caterpillar

	KOMATSU	CATERPILLAR
Sistema	AT	AT
Modelos disponibles	930 E-4 , 830 E-AC 860 E-AC (en diseño) 960 E (en diseño)	793F 797F(no probado en operación)
Sistema de supervisión	FrontRunner V3a (Operativa en 2 sitios) V2a (Operativa en 2 sitios)	MineStar – Command V4 (operativa en 2 sitios)
Capacidad de flota	V3a: 30 AHT / 63 eq. total V2a: 17AHT/30 eq. total	Sin limitaciones de equipos
Tecnología		
Integración con sistemas de gestión de flota	V3a: Dispatch 6 V2a: Sin integración	Todos los productos MineStar (Fleet, Terrain, Detect, Health)
Integración con otras tecnologías	Provisión (Alta precisión)	No conocida
Navegación	HPGPS (primario) Road edge guidance (REG) Láser(secundario)	HPGPS (primario) Dead reckoning (secundario)
Sistemas de detección (ODS)	Laser y radar	Lidar y radar
Comunicación inalámbrica	Wi fi 802.11 a Solución Punto a punto requerida	Wi max (recomendada) Wi fi 802.11
Sistema de control	Sistema control centralizado. No existe comunicación camión a camión. Sistema es inteligente, no los camiones	Sistema semi centralizado. Existe comunicación entre camiones. Sistema es inteligente, camiones toman ciertas decisiones por si solos.
Seguridad		
Capacitación Sistema	Buen nivel de capacitación, con personal presente en Chile, estandarizado y funcionando en Gabriela Mistral	Nivel básico de capacitación, implementado en Australia, debe acomodarse a modelo chileno.
Protección equipos. Burbuja de Seguridad	Sistema considera área de seguridad alrededor de los equipos de 50 m, lo cual es considerado burbuja de seguridad.	Sistema considera área de seguridad alrededor de los equipos de 1.7 veces ancho equipo. Debe mejorar su análisis el oferente.
Protección equipos. sobre de Seguridad	Sistema de sobre seguridad considerado como capa adicional final del sistema.	No presenta esta característica.
Lógica evasión obstáculos	Camión genera automáticamente un curso de	Camión no genera automáticamente un curso de desvío alrededor de obstáculos

	desvío alrededor de obstáculos detectados	detectados. Operación debe ser realizada por MineStar Controller
Sistema de Detección de Obstáculos	Combina sistemas de láser y radar, siendo muy adecuado para detección de objetos o rocas en ruta	Combina sistemas de Radar y Lidar, siendo de menor sensibilidad para detección de objetos o rocas en ruta, puede dañar neumáticos.
Procedimientos	Procedimientos estandarizados a la realidad de Chile, con rápida incorporación a faena Collahuasi.	Procedimientos estandarizados a Australia, se debe asociar a la realidad chilena, mediana velocidad de incorporación.
Protocolo de escoltas	Protocolo protege a equipos sin sistema AHS a través de burbuja seguridad.	Protocolo de escolta depende fuertemente de la disciplina operativa y procedimiento de seguridad, ya que zona de seguridad es menor.

Una definición importante, dada la comparativa anterior, es sumar además que para la Compañía, dentro de sus políticas se encuentra el trabajar con tecnologías conocidas y que este hecho se condice con su ciclo de gestión de riesgos, ya que bajan el nivel de variabilidad que podría tener el proyecto de estudio, es por esta razón que el resto del análisis considera el uso de la tecnología de Komatsu para evaluación.

4.2 Tecnología en equipos de apoyo

Las tecnologías de apoyo que se tienen para los equipos que construyen el tranque corresponden a sistemas que deben hoy en día ser desarrollados con apoyo conjunto entre empresa y proveedor, por lo que el alcance en este trabajo corresponderá a la descripción de la alternativa de poder utilizarlos de manera más autónoma, pero no será la autonomía de trabajarlos de manera no tripulada, más bien se trabajará en hacerlos independientes del apoyo topográfico, con el fin de evitar la presencia de personas en el sector donde operan los equipos.

Los equipos en los que trabajaremos para hacerlos independientes de la marcación topográfica serán:

- Motoniveladoras
- Buldócer
- Rodillos Compactadores

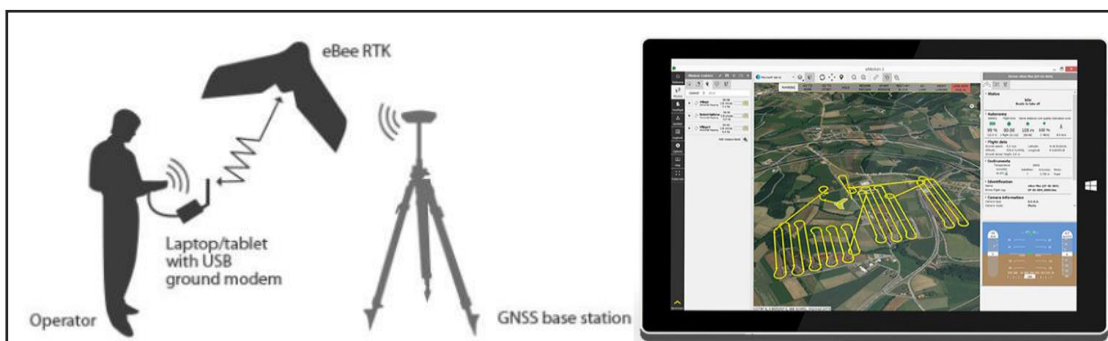
Estos tres equipos son los principales que operan en el tranque y que son los que analizaremos en el desarrollo de este trabajo la posibilidad de volverlos con menor dependencia de marcaciones topográficas para su trabajo en el tranque de relaves.

4.3 Control Topográfico

El actual control topográfico que tiene el tranque de relaves se hace con escáner y con estaciones totales, lo que se analizará en este trabajo será la utilización de un sistema de control no tripulado y que sea capaz de hacer los levantamientos necesarios del tranque de relaves sin necesidad de estar dentro de la operación de los CAEX autónomos y los equipos de apoyo que desarrollan el trabajo de construcción.

Se generará la referencia con una estación base posicionada en un punto conocido y se planificará el vuelo del “Drone” al sector requerido desarrollando el vuelo y tomando los datos.

Figura 4-5 Sistema de DRONE para levantamiento Topográfico en Altura



4.4 Definición del Asarco de Collahuasi.

Dentro del marco conceptual, el análisis del actual sistema de gestión de las flotas de equipos que tiene Collahuasi debe describirse para poder cuantificar los impactos de la nueva propuesta que se tenga para la construcción del muro de relaves.

Los tiempos que involucran el ciclo de trabajo de los equipos mineros que se utilizan en la construcción del muro se verán afectados con el uso de la tecnología autónoma y un punto de comparación será la afectación de las variables que componen el ASARCO de Collahuasi.

El Asarco de Collahuasi se constituye de la siguiente manera:

Tabla 4-2: ASARCO Collahuasi



Donde tenemos:

Tiempo de mantención (TM): mantención o fuera de servicio:

- Tiempo de mantención tanto programado como imprevisto
- Tiempo de espera para realizar una mantención
- Tiempo de espera por el equipamiento de mantención y/o repuestos
- Tiempo de traslados al taller de mantención, (en algunas faenas este tiempo se considera demora por traslado al ser mantención programada)
- Tiempo de esperar dentro del taller por su mantención

Tiempo de reservas (TR): Se considera como el tiempo no operativo debido a condiciones climáticas o que el equipo está sin operador (equipo con motor apagado, sin hacer labor productiva).

Tiempo operacional (TO): Es considerado como la suma del tiempo efectivo y las pérdidas operacionales. También es sumado a este tiempo, las tareas que realiza el equipo no necesariamente de producción.

Tiempo de demoras programadas (DP): Corresponde a colaciones, cambios de turno, tronaduras, carga de combustible, reuniones, etc.

Aquí se puede dividir en dos ítems:

Programados, los que serían colación y cambio de turno

No programados, los otros que no ocurren en todos los turnos, como por ejemplo tronadura, combustible, reuniones u otros.

Además, en la industria este concepto es considerado tiempo operacional, debido a que es parte de la operación, aunque se trate de una ineficiencia la cual debe ser gestionada.

Tiempo de pérdidas operacionales (PO):

- Preparación de frentes de trabajo
- Entrenamiento
- Accidentes / incidentes
- Traslado de equipos
- Inspecciones de equipos, etc.

Para el caso de los tiempos en cola de carga y descarga de material en Collahuasi se miden fuera del tiempo operativo de los equipos. En otras faenas esto puede funcionar de manera distinta, incluso lo podrían gestionar como parte del tiempo efectivo de trabajo.

Tiempo efectivo (TE): Es el tiempo en que el equipo debe estar realizando su labor para lo cual fue fabricado, es decir en el caso de los camiones solo aplican los tiempos de transporte ida y vuelta, acuatamiento para carga y descarga, y tiempo de carguío.

4.4.1 Indicadores de Desempeño

En la industria existen una diversidad de indicadores de desempeño para aumentar la productividad de los recursos que son asignados, de manera de poder disminuir los costos y mejorar en competitividad.

Disponibilidad: La disponibilidad está considerada como el tiempo en el cual el equipo está habilitado mecánicamente para realizar la labor para lo cual fue considerado, dividido por el tiempo nominal.

$$\text{Disponibilidad} = \text{Tiempo disponible} / \text{Tiempo nominal}$$

Utilización: Como bien es sabido, el concepto de utilización está referido al uso eficiente de los activos, Collahuasi ocupa dos conceptos de utilización:

Utilización operativa: Valor porcentual que compara el uso de las horas operativas por cada hora disponible del equipo, es decir:

$$UO = \text{Tiempo Operativo} / \text{tiempo disponible}$$

Utilización efectiva: es el valor porcentual que compara el uso de las horas efectivas por cada hora de operación del equipo, es decir:

$$UE = \text{Tiempo efectivo} / \text{Tiempo Operativo}$$

Este valor mide el tiempo en que se está realizando la labor específica del camión, es decir transportar material, con respecto al tiempo total en que está funcionando con un operador. Este concepto en la industria se conoce como factor operacional.

De los anterior descrito puede ahora ser parte de análisis con el desarrollo de la nueva propuesta:

5 DESARROLLO

5.1 Plan minero considerado

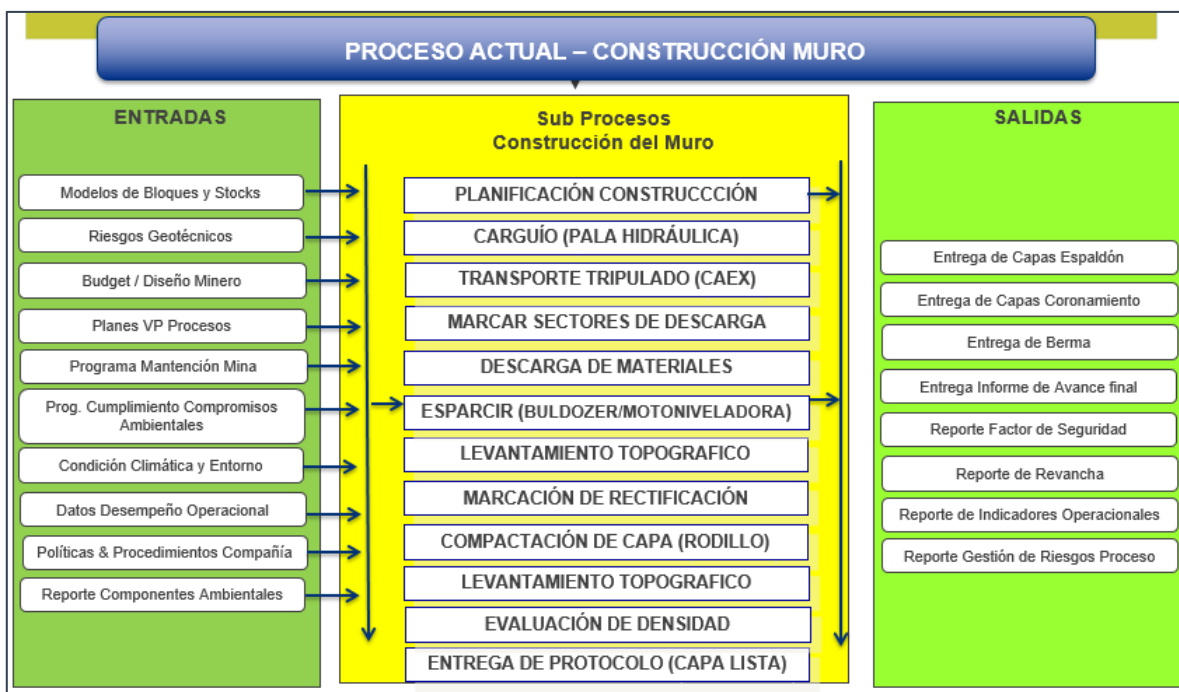
Respecto de la definición de la Compañía, considerando los recursos y reservas del yacimiento, el plan minero de largo plazo, incluye un movimiento anual de alrededor de 17,0 Mton, necesitando para este requerimiento 8 camiones constantemente en las labores de construcción del tranque, con el respectivo número de operadores necesario para manejarlos.

Este material se distribuye en los distintos sectores que tiene el muro de relaves y además se considera un estimado, incluido en los 17,0 Mton, de 20% de rechazo de material, por sobre tamaño principalmente, los que van a disponerse en un botadero cercano al punto de carguío.

5.2 Actual proceso de construcción

A continuación, se presenta un esquema del modelo de proceso que constituye la construcción del muro del tranque de relaves, donde las entradas contenidas en el proceso y las salidas que conlleva el desarrollo de construcción se presentan a continuación:

Figura 5-1 Modelo de Proceso Actual - Construcción Muro de Relaves



Después de haber recibido las entradas definidas en el mapa de proceso presentado en la ilustración anterior, los compromisos anuales de llenado deben ser programados de manera mensual, asignando recursos, tanto activos como personas en las labores de construcción, se definen los tonelajes necesarios para lograr los hitos constructivos que serán los que aseguren una estabilidad requerida y una operación bajo estándar.

Primer paso el carguío en la frente de trabajo, cuestión que es realizada por una pala hidráulica que levanta el material de la frente de trabajo en el botadero y carga los camiones mineros que transportan el material al muro que sostiene los relaves de la Compañía.

La siguiente imagen muestra una vista en planta de los sectores en los que transitan los camiones mineros desde el punto de carga hasta el muro del tranque.

Figura 5-2 Circuitos de Tránsito de Camiones



Una vez que el camión llega al sector del muro de relaves debe disponer los materiales en los distintos sectores del tranque de relaves.

Estos sectores en que se dispone el material corresponde al coronamiento, espaldón y berma, el otro sector llamado transición que se desarrolla con materiales de empréstito, no lo transportan los camiones mineros y corresponde a un porcentaje menor del muro (ilustración 16).

Figura 5-3 Muro del Tranque: Berma, Espaldón, Coronamiento y Transición.

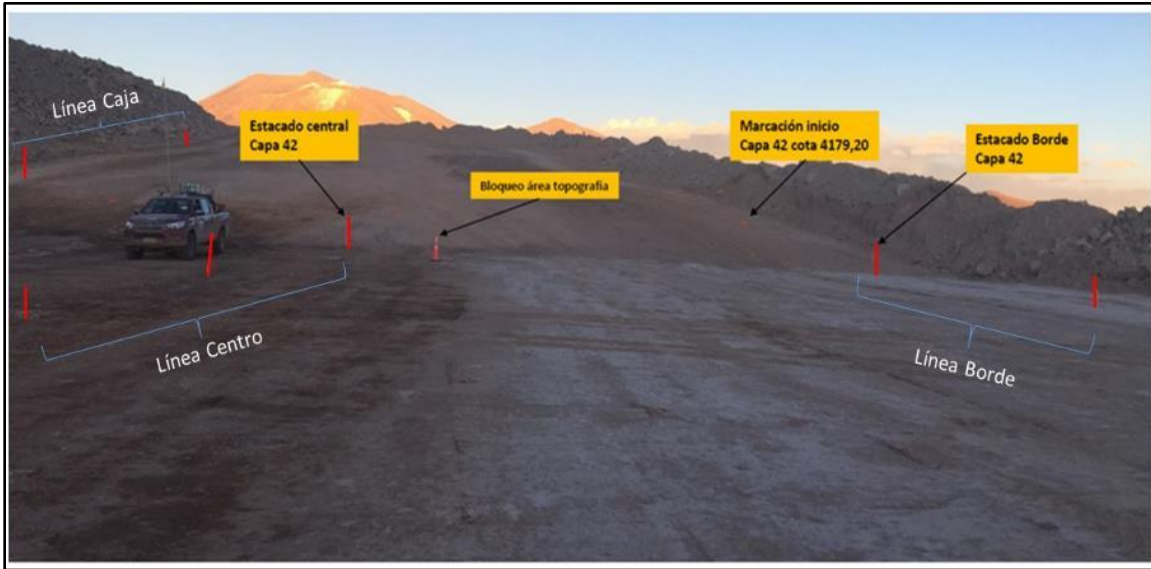


Una vez que los camiones mineros dejan el material en los distintos sectores mencionados, los equipos de apoyo comienzan en primer lugar a estirar el material, esto lo realiza un bulldozer que va estirando el material para dejarlo en capas de 1,5 metros. Para tener la referencia de poder hacer este trabajo los topógrafos y geomensores deben ir dejando estacas al equipo, a medida que va avanzando, con el fin de tener que ir logrando capas de la altura indicada.

Luego del trabajo del bulldozer, los topógrafos nuevamente deben entrar a las zonas donde el material ha sido estirado, para levantar el sector e indicar las desviaciones que no hayan logrado la altura, existen una tolerancia de 10 centímetros en las capas, por lo que si se sobrepasa esta tolerancia se debe dejar una estaca indicando los cm a cortar o rellenar para llegar a lograr la capa de 1,5 metros.

El trabajo de lograr mayor perfeccionamiento y lograr emparejar la capa lo realiza la motoniveladora, para lo cual va revisando cada una de las estacadas que se van disponiendo en los sectores que sobrepasan la altura. Por lo tanto, la cantidad de estacas que se necesitan en esta actividad son considerables y el trabajo de medición también es bastante detallado, ya que se pone un estacado cada 20 metros ubicadas en ambos lados del camino y otra línea al medio del avance del sector (ver imagen siguiente).

Figura 5-4 Estacado Necesario para el Control de Cotas



El trabajo de geomensura del sector es de alta demanda, ya que se avanza una distancia considerable por día, y se trabaja en las distintas frentes de trabajo (Espaldón, Berma y Coronamiento).

Posteriormente al paso de las motoniveladoras pasa un rodillo compactador, con el fin de poder asegurar una densidad definida en las capas estiradas por estos equipos.

En resumen, se trabaja con Camiones, Pala Hidráulica, equipos de apoyo (Bulldozer, Motoniveladora y Rodillo, además de excavadora) y también un equipo de geomensura que trabaja con scanner y estaciones totales.

5.2.1 Sistema de turnos utilizados en la construcción

Se debe considerar que la faena no para ningún día del año y que los operadores trabajan en turnos 7x7; por lo tanto, tenemos 4 turnos para cubrir este trabajo, trabajando tanto de día como de noche para los equipos de apoyo y para el sistema pala – camión minero.

Para el caso del equipo de geomensura solo trabaja en turno de día y se cubre este trabajo con 2 turnos, que también están en un sistema 7x7.

5.2.2 Resumen de equipos y operadores

El siguiente cuadro presenta una tabla resumen de los equipos necesarios que involucra la construcción del muro.

Tabla 5-1: Equipos Para la Construcción del Muro de Relaves

Equipos Carguío y Transporte		N° Equipos
CAEX		8
Pala Hidráulica		1
Equipos de Apoyo		N° Equipos
Motoniveladora		1
Bulldozer o Tractor		2
Rodillo		2
Cargador 980		1
Regador		1
Tolvas		2
Excavadora		1
Equipos Geomensura		N° Equipos
Scanner		1
Estación Total		1

Respecto los operadores necesarios para cubrir los requerimientos de operación y de control del muro son los siguientes:

Tabla 5-2: Operadores necesarios para el Tranque de Relaves

Operadores Carguío y Transporte	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
CAEX	8	32	16%	37
Pala Hidráulica	1	4	16%	5
Operadores de Apoyo	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
Motoniveladora	7	28	16%	33
Bulldozer o Tractor				
Rodillo				
Cargador 980				
Regador				
Tolvas				
Excavadora				

Geomensura	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
Geomensor	1	2	16%	2
Alarifes	2	4	16%	5
Total Operadores	18	66		82

5.2.3 Sistema de crecimiento del muro de relaves

A continuación, podemos observar una imagen que describe la manera en que se construye el muro del tranque de relaves, y la siguiente corresponde a la revancha del muro, que debe procurar tener siempre una altura de 3 metros que corresponde a tener siempre 3 metros sobre el nivel del relave contenido.

Figura 5-5 Altura de Muro de Relaves 2017: 70 metros

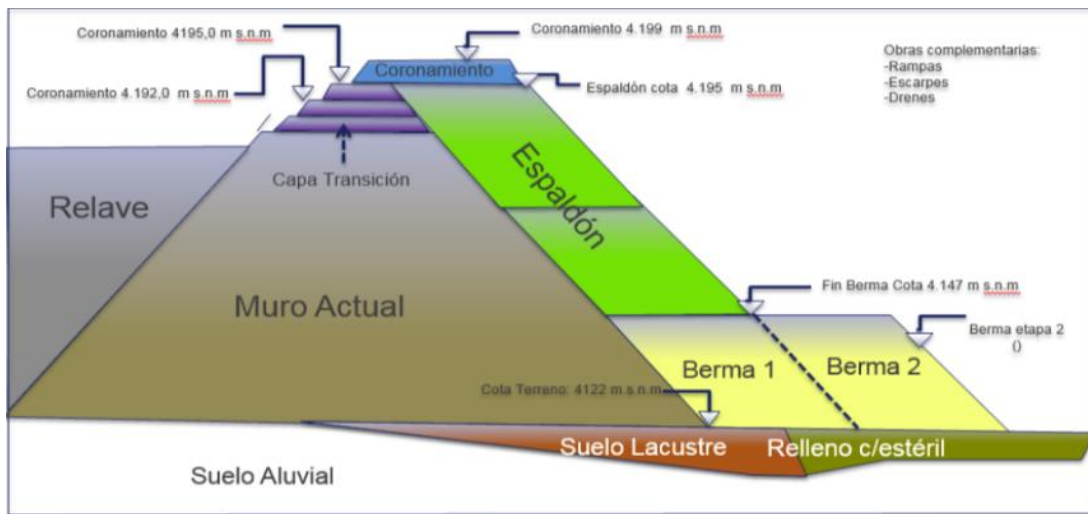


Figura 5-6 Revancha que Tiene Relave vs Altura Muro



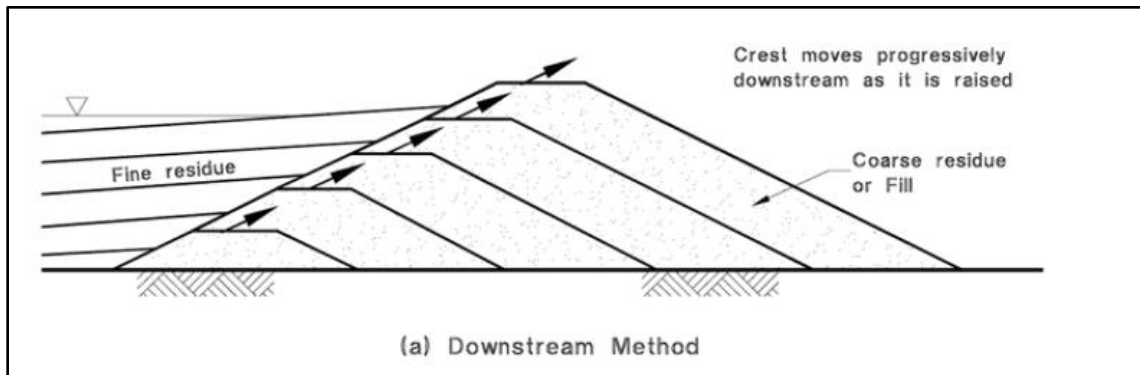
En general, para desarrollar el muro de relaves e ir logrando su altura, primero se desarrolla, como se observa en la figura, crecimiento de la berma (Berma 1, en la figura anterior) que va creciendo en las capas de 1,5 metros, mencionadas anteriormente, luego de llegar a una cierta altura se comienza a llamar espaldón y sigue creciendo, mientras que en paralelo comienza el crecimiento de una nueva berma (Berma 2).

Una vez que el espaldón llega al mismo nivel que el coronamiento, se comienza a lograr mayor altura del muro completo, haciendo crecer el coronamiento, también con capaz de 1,5 metros, con esto el muro va logrando mayor crecimiento.

El coronamiento llega hasta una cierta altura donde pueden transitar los camiones y luego debe esperar hasta que el nuevo espaldón llegue a su cota para levantar nuevamente la cota o altura del muro.

Esta metodología de crecimiento corresponde a método aguas abajo, donde se construye sobre un eje de base suelo natural, material de empréstito o arena. Collahuasi usa en su muro materiales de empréstito y mina, lo anterior le confiere una condición de mayor seguridad, pero con un costo mayor.

Figura 5-7 Método Crecimiento Muro Agua Abajo



En general para lograr la altura actual del muro se deben realizar alrededor de 46 capas de 1,5 metros, por lo que este trabajo es bastante repetitivo y la secuencia de crecimiento del muro es bastante sistemática lo que se convierte en un proceso interesante para desarrollar como una propuesta de automatización.

De esta sistematización se deduce que la propuesta que tiene esta tesis, sea una opción que debe ser analizada de manera más detallada, para observar los beneficios para el proceso constructivo del muro del tranque de relaves.

5.3 Alternativa propuesta

La alternativa que propone este trabajo, involucra una manera distinta de abordar la construcción del muro de relaves, utilizando tecnología con sentido, cambiando la manera de hacer el proceso actual, donde aparecerán nuevas entradas a considerar en los inputs del proceso y la forma de operar será con la utilización de distintas alternativas que nos ofrece el mercado, lo que involucra el desarrollo de la construcción con equipos más automatizados, evitando o minimizando la interacción hombre máquina, entregando un producto que pretende el mismo fin, tener un muro construido que cumpla las exigencias de revancha y factor de seguridad, pero realizado y gestionado de una manera diferente.

1°. – Se propone la utilización de camiones autónomos en el circuito correspondiente al de la construcción del muro de relaves, que va desde la zona de carga, antiguos botaderos del rajo Ujina, hasta llegar a la zona de descarga que corresponde al muro del tranque de relaves que se está construyendo para contener todos los relaves de nuestro plan de largo plazo.

2°. - Además de eso también proponemos la incorporación de controles adicionales a los equipos de apoyo, integrando los proyectos de desarrollo del muro de relaves, por lo tanto, se incorporarán las cotas a perseguir por ejemplo el bulldozer y las motoniveladoras para que no sea necesario la utilización de marcaciones

topográficas constantemente, como se hace hoy en día. Esto traerá como beneficio la no interferencia de personas dejando estacas en los sectores del muro.

3°. - Tercer punto, considerar que para mejorar los trabajos que involucra la construcción del muro de relaves se evaluará la incorporación del levantamiento topográfico mediante el uso de drones, que desarrollaran la topografía de control de avance de los distintos sectores de construcción (Espaldón, Coronamiento y Bermas) minimizando la exposición de los geomensores y sus alarifes en los distintos sectores del muro. Se define trabajar solo con un alarife en este sistema a diferencia de los dos utilizados a la fecha.

Estos tres puntos serán analizados, pero como se ha indicado anteriormente, no involucrando la implementación de éstos, más bien es la evaluación estimativa, tal como se mencionó en el punto de metodología de esta tesis, comparando la actual manera de operar versus la nueva propuesta.

Del punto de vista de la gestión, que es parte de lo que pretende presentar este trabajo, se observan oportunidades interesantes con la incorporación de la tecnología autónoma en los camiones mineros, también con la incorporación de los proyectos ingenieriles a los equipos de apoyo y potenciará también la posibilidad de mejorar el trabajo, del punto de vista de la seguridad de las personas la posibilidad de utilizar sistemas más modernos para hacer la topografía.

La incorporación de estos tres puntos generará una nueva forma de hacer las cosas en la construcción del muro de relaves, haciendo una operación más confiable y más sustentable, lo que hace de estas iniciativas una alternativa de desarrollo interesante para la Compañía.

A continuación, comenzaremos a evaluar la potencialidad que tienen estas tres alternativas de mejorar el sistema actual de construcción del muro.

Partiremos por presentar la nueva propuesta del proceso constructivo, tal como mostramos la metodología actual, observaremos las entradas del proceso nuevo con la utilización de las propuestas, y las salidas como quedan con estas alternativas:

El sistema nuevo involucrará algunos inputs antes no considerados, tales como la entrega de modelos digitales para cargar en los equipos que trabajen en el muro, esto deberá ser una responsabilidad del equipo de planificación minera que deberá entrega de manera mensual esta información a los equipos que desarrollen la construcción del muro.

Deberemos tener un plan de mantenimiento acucioso y fuerte respecto las redes inalámbricas en el sector del muro de relaves, que entreguen una disponibilidad del 100%, por lo tanto, se deberá considerar como parte relevante de todo el sistema para su correcta operación.

Además, en las entradas del proceso constructivo generar planes de mantenimiento de los sistemas de automatización o navegación de los equipos que lo contengan en su operación, que corresponde a los Camiones Autónomos, Equipos de Apoyo (Motoniveladoras – Bulldozer – Rodillo Compactador) y los equipos de levantamiento topográficos (DRONES).

Las demás entradas deberían mantenerse similares a las ya existentes en el proceso.

Figura 5-8 Modelo de Nuevo del Proceso - Construcción Muro de Relaves



Respecto el proceso de construcción, existirán algunos cambios relevantes, por ejemplo, se debe considerar una nueva manera de planificar:

La planificación deberá considerar los espacios de trabajo que requieren los autónomos, incluyendo un ajuste de los anchos a necesitar en el coronamiento del muro, que tendrá que ser ajustado para asegurar un correcto transporte de material con los CAEX autónomos, considerar además, la interacción de los equipos autónomos (CAEX) con los equipos que estarán tripulados, como lo serán las motoniveladoras, bulldozer y rodillos del sector, además de las camionetas de los supervisores que transitarán por el sector, ya sea en labores de supervisión o haciendo levantamientos topográficos.

En las labores de carga se deberá definir un área de carga, donde la pala, al mando de un operador, realizará las labores de carguío de material a un camión, sin tripulante, que se aculatará de manera autónoma y luego dejará el lugar para otro equipo de transporte.

El material transportado por los mismos circuitos usados actualmente, ajustados a los requerimientos de los equipos autónomos, será depositado en cada uno de los sectores del muro (Espaldón, Coronamiento y Berma).

En cada uno de los sectores, se deberá ir generando la descarga de los materiales, de acuerdo al avance que se vaya actualizando según la topografía del sector.

Una vez que el material este en los destinos, los equipos de apoyo comenzaran las labores de estiramiento de material y compactación. Este trabajo no requerirá de intervención de topógrafos, ya que los equipos sabrán en sus cabinas cuales son las cotas a perseguir y con su sistema de navegación podrán realizar las correcciones necesarias.

Se realizarán las pruebas por equipo externo, tal como se realiza hoy en día, la verificación de las densidades exigidas en cada una de las capas del muro, en el caso de necesitar corrección, se deberá definir la zona de vaciado para los camiones y generar la corrección para obtener lo requerido. Los re-trabajos hoy en día corresponden a un estimado de 1 a 2% y esto no debiese cambiar, ya que son cambios que no tienen que ver con el proceso constructivo, más por precipitaciones que ocurren en el sector del muro.

Respecto los levantamientos topográficos se realizarán mediante el uso de un DRONE que posee el área de geomensura mina, que ya ha sido validado y utilizado en la altura de Collahuasi. Este equipo evitará la interacción de los topógrafos en el área donde se mueven los equipos, solo se desarrollarán trabajos puntuales que sean a solicitud para entrar y marcar en terreno. En resumen, control mensual será mediante DRONE evitando la interacción hombre - máquina.

5.3.1 Ajuste de operadores y equipos de la nueva propuesta

Respecto al ajuste de equipos, los equipos de apoyo no sufren variaciones ya que se mantienen en la misma cantidad, en el caso de los equipos de transporte se elimina un equipo, por mejoras en la utilización del equipo y la disponibilidad. Finalmente, en el caso de los equipos topográficos se cambia el uso de un Scanner por un DRONE que realizara los levantamientos topográficos de control del sector de construcción del muro, ver tabla a continuación:

Tabla 5-3: Nueva Flota Para la Construcción del Muro de Relaves

Equipos Carguío y Transporte	N° Equipos
CAEX	6
Pala Hidráulica	1
Equipos de Apoyo	N° Equipos
Motoniveladora	1
Bulldozer o Tractor	2
Rodillo	2
Cargador 980	1
Regador	1
Tolvas	2
Excavadora	1
Equipos Geomensura	N° Equipos
DRONE	1
Estación Total	1

Para el caso de los operadores, en este punto se logra un mayor impacto, principalmente en los operadores de CAEX, que ya no están en el equipo operando, más bien se necesitara solo un SPS que deberá hacer las labores de despacho para el tranque de relaves, que no existía antes en esta dotación, tarea que realiza el actual despacho mina.

La tabla siguiente indica la cantidad de operadores a trabajar en la construcción del muro del tranque de relaves:

Tabla 5-4 Operadores en tranque de relaves bajo la nueva metodología de construcción

Operadores Carguío y Transporte	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
CAEX	0	0	0	0
SPS de Despacho	1	4	16%	5
Pala Hidráulica	1	4	16%	5
Operadores de Apoyo	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
Motoniveladora	7	28	16%	32
Bulldozer o Tractor				
Rodillo				
Cargador 980				
Regador				
Tolvas				
Excavadora				

Geomensura	Por Turno	Nominal	Ausentismo, Licencia y Vacaciones	Total
Geomensor	1	2	16%	2
Alarifes	1	2	16%	2
Total Operadores	11	44		47

El sistema de turnos se mantendrá igual al actual sistema, se continuará trabajando 24 horas los 7 días de la semana, en dos turnos por día.

A continuación, se desarrolla una evaluación económica que compara situación actual versus la nueva propuesta:

En esta evaluación se analizarán las mejoras del punto de vista de la disponibilidad de los equipos, los consumos de neumáticos, mejoras del uso de la flota de transporte para identificar los beneficios económicos de la propuesta.

6 EVALUACION DE LA PROPUESTA (Productividad, Variabilidad del Proceso, Análisis Económico)

6.1 Productividad de la Nueva Propuesta

La productividad del sistema puede ser medida de distintas maneras, pero en este caso, podemos relevar la productividad midiendo la cantidad de toneladas movidas por hombre comparando el actual sistema constructivo versus la nueva propuesta que usa más tecnología:

Recordando que el movimiento exigido para cumplir con el plan minero corresponde a 17 millones de toneladas de material por año, esto es logrado con una cantidad distinta de personas asociadas al proceso que se seleccione, si vemos el actual proceso, este requiere de 82 personas (ver - Tabla 5-2: Operadores necesarios para el Tranque de Relaves) mientras que si observamos el número de personas para construir el muro con el nuevo proceso propuesto, tenemos que necesitamos de 47 personas (ver - Tabla 5-4 Operadores en tranque de relaves bajo la nueva metodología de construcción).

Así, considerando las estimaciones antes indicadas podemos decir que las toneladas movidas por sistema son:

- Actual proceso constructivo (tonelada/persona): $17000(\text{kton}) / 82(\text{Personas}) = 207 \text{ kton/persona}$.
- Nueva Proceso (toneladas/persona): $17000(\text{kton}) / 47(\text{Personas}) = 362 \text{ kton/persona}$.

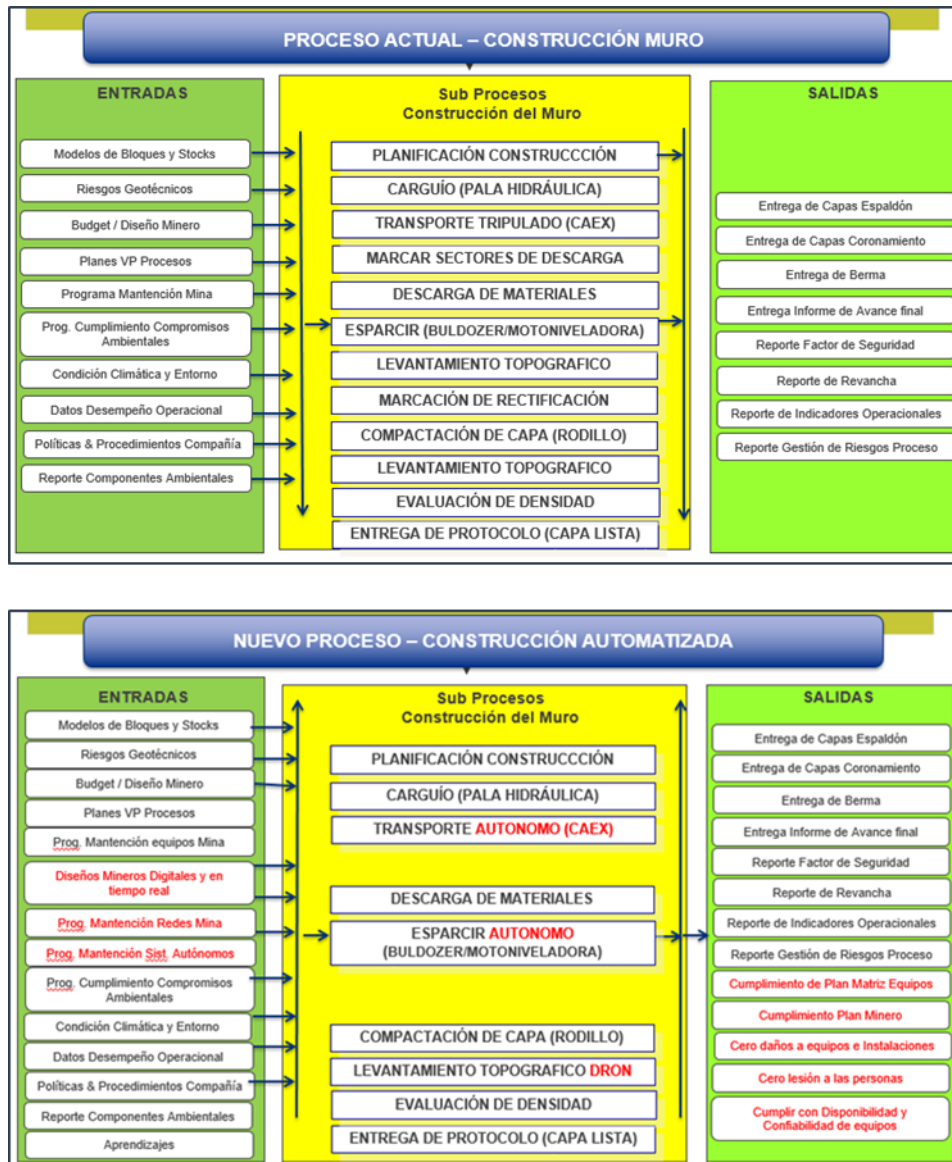
Esto significa que la nueva propuesta desde el punto de vista revisado sube la productividad del proceso constructivo en un $(362/207) = 74,9\%$.

6.2 Variabilidad del proceso constructivo del tranque

Para ver la variabilidad del proceso constructivo hemos realizado un análisis de los subprocesos más relevantes que tiene la construcción del muro de relaves.

Las siguientes imágenes nos presentan el proceso constructivo actual, con sus entradas y salidas y el proceso interno que conlleva el trabajo de construir el muro y la nueva propuesta también con el mismo análisis del proceso.

Figura 6-1 Comparación de Actual versus Nuevo Proceso Constructivo



Es posibles apreciar que los procesos tienen variaciones importantes tanto en las entradas como en las salidas de ellos, lo que está en directa relación a la variación en sí del proceso de construcción, destacando que la nueva propuesta deberá incluir la entrega de diseños mineros digitales, la mantención de redes mina, para asegurar siempre la cobertura contundente y oportuna que el sistema necesita, además de la mantención del sistema de autonomía de los CAEX.

Por otro lado, respecto los subprocesos involucrados en la construcción del muro, se evitarán algunas actividades que hoy en día existen y generan algunos riesgos, por ejemplo, las marcaciones en los sectores de descarga, los levantamientos topográficos constantes (día a día), alarifes con estacas en el sector donde transitan los equipos, rectificaciones de corrección, que son muy habituales en la lógica actual y que revisten una interacción muy riesgosa Hombre – Máquina.

Respecto las salidas que tenemos del proceso nuevo existen exigencias que debiese cumplir esta nueva metodología y que se estima serán la búsqueda del nuevo sistema “como metas a perseguir”, esto es: lograr cero daño a equipo o instalaciones, el proceso debe ser más seguro y por ende menos riesgoso evitando daños a lo antes mencionado, el cero daño también a las personas involucradas en el proceso será otra exigencia y el cumplir con mejoras en disponibilidad y confiabilidad del proceso constructivo será una consecuencia que se estima logrará resultados positivos del punto de vista de la gestión del proceso.

De lo descrito y presentado, a continuación, se analiza desde el punto de vista de la gestión de los riesgos la nueva propuesta versus la existente, para lo cual se desarrolla una matriz de riesgos en base a probabilidad y consecuencia, que ha sido levantada con las personas que actualmente trabajan en el proceso constructivo.

A continuación, se presenta el análisis en la siguiente tabla.

Tabla 6-1: Matriz de Riesgos - Evalúa actual versus nuevo proceso Constructivo

TAREA	DESCRIPCIÓN	PELIGROS OPERACIONALES PARA PERSONAS O ACTIVOS (EQUIPOS)	PROCESO ACTUAL			NUEVO PROCESO			COMENTARIOS
			PROBABILIDAD	CONSECUENCIA	RESULTADO	PROBABILIDAD	CONSECUENCIA	RESULTADO	
Carguío	Carga de Pala a CAEX, Sector de Botaderos	- Choque entre Pala y CAEX - Afectación de Op. CAEX - Afectación de Op. Pala - Afectación de Topógrafo en tarea de control.	4	3	12	3	2	6	El carguío estará dentro del área de trabajo guiada por el palero, donde ya no existe el trabajo del operador del CAEX, ya que será aculata de manera automática, por lo que baja el riesgo.
Transporte	Transporte de Material por circuito definido	- Choque entre CAEX - Choque entre equipos - Afectación de Op. CAEX - Afectación de Op. Equipo de Apoyo - Afectación de Topógrafo en tarea de control.	3	4	12	2	2	4	Por incorporación de la tecnología autónoma se minimizará la probabilidad de colisión de manera importante, además los equipos de apoyo serán un punto que en el caso de cercanía menor a una distancia definida implicarán detención del sistema de transporte.
Descarga	Descarga de material en los distintos puntos (Espaldón, Coronamiento, Berma)	- Choque entre CAEX - Choque entre equipos - Afectación de Op. CAEX - Afectación de Op. Equipo de Apoyo - Afectación de Topógrafo en tarea de control - Descarrilamiento de CAEX en tareas de descarga.	4	4	16	2	2	4	El sector de descarga deberá ser actualizado constantemente, pero realizando este control el CAEX que descarga en este sector lo hará de manera más confiable ya que no pasara los límites definidos para este trabajo, minimizando el riesgo en el sector.
Compactación	Trabajo que se realiza para esparcir el material y luego compactarlo	- Aplastamiento de Topógrafo en las tareas de marcación o control topográfico - Retrabajos por mala gestión de la tarea de esparcir el material.	3	5	15	2	3	6	Los geomensores o alarifes hoy en día instalan estacas para definir los controles, ya sea de corte o rellenos necesarios para cumplir con las especificaciones técnicas de construcción, pero ya que los equipos de apoyo tendrán incorporados los proyectos, por capa, a perseguir el riesgo se minimiza.
Control Topográfico	Trabajo que se realiza de marcar los sectores de deposición y las cotas que se deben lograr para tener las capas en la altura correspondiente, también el trabajo de evaluar el trabajo de manera topográfica, cuando se ha terminado el avance de una capa.	- Aplastamiento de Topógrafo en las tareas de marcación o control topográfico - Retrabajos por mala gestión de la tarea de esparcir el material.	4	4	16	2	3	6	Los geomensores o alarifes en el sector no debiesen presentarse, ya que los equipos de apoyo tendrán incorporados los proyectos, por capa, a perseguir. Por lo tanto al no estar presente el topógrafo se minimiza el riesgo, aunque se asume o considera que puntualmente deberán asistir en algún control del proceso.

De este levantamiento podemos observar una baja en la probabilidad de ocurrencia de eventos que pueden impactar las distintas tareas presentadas como parte del proceso constructivo, también es posible observar que las consecuencias de la nueva forma de construcción serán menores, lo que entrega como resultados un impacto menor para las personas y equipos, lo que se traduce en un proceso de trabajo más seguro y que involucrará una baja en la variabilidad de la construcción del muro de relaves de la Compañía.

Continuando el análisis de la nueva propuesta, nos queda observar los resultados económicos de poder incluir estas nuevas tecnologías tanto en los camiones mineros como en los equipos de apoyo, junto con el uso de drones para los levantamientos topográficos del muro de relaves.

6.3 Análisis Económico del uso de Tecnología en la construcción del tranque de relaves

Para el análisis económico se consideran varias mejoras del nuevo proceso a desarrollar, que incluye los CAEX autónomos, que es lo más relevante a la hora de evaluar el impacto económico de esta propuesta para implementar.

En este mismo sentido, la utilización de los CAEX se verá afectado de manera positiva lográndose evitar los horarios de colación, ya que no tendremos equipos tripulados, solo existirá el efecto de cambios de turno, que también será minimizado, ya que en la práctica solo la pala afectará la continuidad de uso de los camiones.

Respecto la disponibilidad de la flota de CAEX, también tendrá efectos positivos de acuerdo a los compromisos entregados por Komatsu, ellos indican que podremos llegar a subir la disponibilidad tal como se presenta en la siguiente tabla, donde se aprecia la estimación de utilización y disponibilidades para los CAEX autónomos en los próximos 5 años. En el plazo de 5 años los equipos ya estarán es utilizations de 91,5% y disponibilidad de 92,0% los que involucra un importante aporte en las horas operativas del sistema.

Tabla 6-2: Tabla de Variación de Utilización y Disponibilidad de Caex (Tripulados vs AHS)

		2019	2020	2021	2022	2023	Total
Utilización Actual	%	82,00%	82,00%	82,00%	82,00%	82,00%	82,00%
Utilización Estimada	%	94,00%	94,00%	93,20%	92,50%	91,50%	93,04%
Disponibilidad Actual	%	83,00%	83,00%	83,00%	83,00%	83,00%	83,00%
Disponibilidad Estimada	%	93,00%	92,50%	92,00%	92,00%	92,00%	92,30%

Con esta información, además de los datos del contrato, estimados para los camiones autónomos se observa a continuación las variaciones del costo por tonelada de la propuesta versus la actual metodología.

Esto incluye el uso de drones para los levantamientos topográficos del sector, lo que involucra que la dotación de personas por el lado de la geomensura baja según la tabla presentado en el punto de “Ajuste de operadores y equipos de la nueva propuesta” Tabla 5-4 Operadores en tranque de relaves bajo la nueva metodología de construcción.

La siguiente tabla presenta la comparación del costo unitario de transporte, que es el costo más importante del desglose del costo de operación del tranque de relaves. Donde se logra, luego de la incorporación de la tecnología autónoma conjuntamente con el ajuste de dotación en topografía, menores gastos por año de construcción, ahorrando un total de MUS\$13,4 en 5 años de operación y un total de MUS\$ 39,8 en 15 años de operación.

Tabla 6-3: Resultados de Ahorro por la implementación de la nueva propuesta de construcción del Muros de Relaves

Ahorros en Gastos de CAEX para 17,0 Mton anuales de movimiento																		
ÍTEM	Unidad	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	15 Años	5 Años
Días por Año	Días	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	5479	1826
Costo Unitario en ton																		
Caso Actual (CAEX Normal - Tripulado)	US\$/ton	1,34	1,39	1,56	1,88	1,43	1,59	1,63	1,76	1,49	1,73	1,91	1,39	1,84	1,60	1,60	1,61	1,52
Caso Actual (CAEX AH)	US\$/ton	1,24	1,29	1,52	1,24	1,40	1,43	1,35	1,32	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,34
Diferencia por año (Ahorros)	US\$/ton	0,10	0,09	0,04	0,65	0,03	0,16	0,28	0,44	0,15	0,40	0,58	0,06	0,51	0,27	0,27	0,27	0,18
Gasto Anual por Año (Según CAEX)																		
Gasto CAEX Normal	KUS\$	22.835	23.651	26.620	32.094	24.310	27.174	27.792	29.969	25.300	29.478	32.596	23.642	31.364	27.330	27.301	411.458	129.510
Gasto CAEX AH	KUS\$	21.122	22.086	25.909	21.114	23.814	24.498	22.983	22.412	22.681	22.681	22.681	22.681	22.681	22.718	22.700	342.761	114.045
Ahorros anuales	KUS\$	1.714	1.565	711	10.980	496	2.676	4.809	7.557	2.619	6.797	9.915	961	8.683	4.612	4.601	68.697	15.465
		Total 15 Años		Total 5 Años														
Ahorros Actualizados	KUS\$	38.645		12.853														
Ahorros en Gastos de Topografía																		
ÍTEM	Unidad	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	15 Años	5 Años
Días por Año	Días	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	5479	1826
Personal																		
Condición Actual (1 Geomensor +2 Alarifes)/turno	KUS\$	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	5.398	1.799
Condición con DRONE (1 Geomensor+1 Alarifes)/turno	KUS\$	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	3.596	1.199
Ahorros anuales	KUS\$	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	1.803	601
		Total 15 Años		Total 5 Años														
Ahorros Actualizados	KUS\$	1.111		518														

Con estos resultados la incorporación de la tecnología se hace atractiva y presenta una oportunidad importante, que nos hace ver una manera distinta de operar la construcción del muro del tranque de relaves.

Por otro lado, debemos considerar aspectos relevantes a la hora de implementar esta nueva propuesta, cuestiones que pueden revertir un riesgo a la hora de operar con este nuevo sistema. A continuación, se relevan algunos de los riesgos de la propuesta.

6.4 Riesgos de Implementación

6.4.1 Cultural

La actual forma de operar no solo tiene que ver con los equipos y la manera técnica en que se desarrollan las labores, sino que tiene que ver con la cultura actual que tiene el desarrollo y construcción del muro de relaves. Es por esta razón que se deberá analizar en mayor profundidad el impacto que tendrá la nueva forma de operar la construcción del muro, del punto de vista del efecto en las personas que laboran en este proceso y el posible impacto que se tenga en los sindicatos de la Compañía, que pudiesen ser un punto bastante relevante que debe ser gestionado de buena manera al interior de Collahuasi.

6.4.2 Comunicación

La propuesta de implementación deberá tener una manera adecuada de comunicar a los distintos stakeholder el nuevo proceso con el cuidado de mostrar el correcto beneficio que tendremos en temas de seguridad y productividad del sistema, haciendo al proceso más sustentable en el tiempo, donde se deberá relevar el cuidado a las personas y activos involucrados, haciendo un proceso más rentable y con la oportunidad de aprender del uso de la nueva tecnología.

6.4.3 Evaluación Preliminar

Se sugiere como medida de control de riesgos tener un periodo de prueba para ver con el equipo de Komatsu el logro de las metas de disponibilidad y uso de los equipos de transporte, apuntando a lograr una mayor confiabilidad de la flota, con el fin de corroborar de mejor manera el impacto de estos indicadores, muy relevantes, a la hora de hacer el análisis económico de los beneficios de contar con esta nueva tecnología.

6.4.4 Riesgo de Cobertura del sistema autónomo

Necesitamos relevar la importancia de tener un sistema robusto a la hora de utilizar la tecnología autónoma, esto es primordial para lograr siempre tener controlada a la flota, por lo que deberá tenerse un análisis profundo de mejorar la actual capacidad que tenemos de cobertura en la faena, asegurando un 100% de cobertura con sistema de respaldo, para nunca fallar, sabiendo siempre donde se encuentran los equipos en tránsito y evitar cualquier riesgo a las personas o activos de nuestra Compañía.

Finalmente visto los cuatro puntos anteriores es relevante observar las conclusiones y recomendaciones de lo que podría ser una propuesta interesante de llevar adelante, con el fin de poder generar un aporte importante para la gestión de la Compañía.

7 CONCLUSIÓN

Haciendo un breve resumen de lo que se ha presentado es importante mencionar, tal como lo indicamos en la justificación de esta propuesta, la Compañía está buscando tener siempre procesos más controlados, con menores variabilidades en su ejecución y esto ha sido considerado a la hora de proponer esta mejora a un sistema ya existente en nuestra faena. Otro tema también importante y que se deriva desde este mismo foco de “control del proceso”, es minimizar los riesgos a las personas o equipos con lo que se evitan afectaciones de la continuidad operacional involucrando mejores resultados en la gestión del trabajo a desarrollar.

Los resultados de productividad que se han presentado, han sido beneficiosos considerando que se ha logrado un aumento significativo en la productividad del sistema actual versus la nueva propuesta, pasando de una productividad de 207 kton/persona a 362 kton/persona que trabajarán en la nueva forma de operar el tranque. Esto implica una mejora de un 75% más de movimiento de material por persona ligada a este proceso de construcción.

Respecto la gestión de los riesgos, punto muy relevante para nuestra cadena de valor que busca siempre tener un sistema más controlado a la hora de ejecutarlo, los resultados presentados en la tabla resumen *Tabla 7-1: Matriz de Riesgos*, son bastante auspiciosos y deberían generar grandes beneficios respecto a la baja de riesgos en la ejecución de esta propuesta, ya que se minimizan los impactos a las personas, equipo y derivan en un proceso más controlado que minimiza la tan buscada confiabilidad de un sistema, quitándole riesgos en su ejecución.

Por el lado de la evaluación económica del sistema que se pretende perseguir para lograr su implementación, los resultados se observan bastante buenos, ya que logran considerables ahorros en la construcción del muro de relaves, mejorando el costo unitario de la operación, pasando de un costo de transporte de 1,52 US\$/ton versus 1,34 US\$/ton con el uso de la tecnología autónoma. Lo anterior sumado a la gestión de geomensura, al usar drones para los levantamientos topográficos, minimizando la dotación en su trabajo de terreno, se obtiene un ahorro de MUS\$13,4 en 5 años de operación y un total de MUS\$ 39,8 en 15 años de operación.

Finalmente es conveniente señalar que del punto de vista estratégico, poder tener un sistema como el presentado en esta trabajo tiene una arista bastante interesante de analizar, y es que tener un sistema automatizado operando en la faena, podrá ser un punto importante para obtener experiencia para desarrollar otros sectores de nuestra faena usando esta tecnología, lo que se traduce en una oportunidad relevante de hacer más pruebas a futuro, que puedan mostrarnos el camino de mejorar y operar nuevos sectores, generando una posibilidad clara de ir avanzando en una operación más segura, confiable, productiva y con menores costos de

operación, cuidando a nuestra gente y activos que nos sigan mostrando el camino a la sustentabilidad en Collahuasi.

No obstante, se deberá trabajar en varios puntos anexos a los propuestos, por ejemplo, el tema cultural de Collahuasi en la operación del tranque, un programa comunicacional con los distintos stakeholder traspasando los beneficios del uso de tecnología a la mejora de los procesos, cuidando el sentir de la gente de la compañía, trabajos profundos en las coberturas que requieren los equipos autónomos para evitar problemas con esta tecnología y poder transitar a una minería más segura y sustentable en el tiempo.

La recomendación entonces, es lograr generar los pasos necesarios para poder llevar adelante esta propuesta, que trae consigo varias oportunidades de mejora a nuestro proceso operativo y de gestión, que involucra la construcción del muro de relaves de nuestro yacimiento.

8 BIBLIOGRAFÍA


1. “Collahuasi Autonomous Trucks Board Paper (english-final)”, Preparado por equipo VPM, enero 2019.
2. “Workshop: Komatsu - Implementación Camiones Autónomos” 10 de mayo del 2018 - Komatsu Chile.
3. “Avance estudio pre factibilidad AHS – Operación Mina Ujina”, preparado por Haultrax, septiembre 2015.

9 ANEXO

9.1 Resumen Budget 2019

Resumen Budget 2019														2019
	Unidad	31 Enero	28 Febrero	31 Marzo	30 Abril	31 Mayo	30 Junio	31 Julio	31 Agosto	30 Septiembre	31 Octubre	30 Noviembre	31 Diciembre	365 TOTAL
Cu Fino Producido	<i>Kton</i>	43,0	36,2	39,5	36,5	44,0	49,8	48,0	50,3	49,4	51,1	53,8	52,8	554,4
Cu Fino Filtrado	<i>Kton</i>	43,0	36,2	39,5	36,5	44,0	49,8	47,9	50,3	49,3	51,1	53,8	52,8	554,0
Cu Fino Catodos	<i>Kton</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cu Total (Filtrado + Catodos)	<i>Kton</i>	43,0	36,2	39,5	36,5	44,0	49,8	47,9	50,3	49,3	51,1	53,8	52,8	554,0
Mo Fino Producido	<i>Kton</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,29	0,30	0,43	0,77	0,60	0,89	0,82	4,26
Movimiento Mina (Sin Tranque)	<i>Kton</i>	20.244	19.633	21.216	23.910	22.337	21.485	21.595	21.729	20.827	22.008	24.304	23.301	262.589
Movimiento Rosario	<i>Kton</i>	20.244	19.633	21.216	23.910	22.337	21.485	21.595	21.729	20.827	22.008	24.304	23.301	262.589
Movimiento Ujina	<i>Kton</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Movimiento Tranque	<i>Kton</i>	1.408	1.262	1.456	1.456	1.505	1.359	1.456	1.505	1.456	1.505	1.456	1.456	17.280
Movimiento Total	<i>Kton</i>	21.651	20.895	22.672	25.367	23.842	22.844	23.051	23.234	22.283	23.513	25.760	24.757	279.869
Expit Rosario	<i>Kton</i>	19.236	18.686	20.742	23.510	21.937	20.585	20.752	20.942	20.368	21.608	23.604	22.401	254.373
Fase09	<i>Kton</i>	1.191	998	888	938	671	558	884	910	1.055	744	946	747	10.530
Fase10	<i>Kton</i>	11.488	9.966	9.461	8.623	7.926	8.738	6.665	6.842	6.655	6.143	7.195	6.036	95.737
Fase 11	<i>Kton</i>	3.450	3.099	3.408	3.447	3.471	3.384	3.334	3.360	3.255	4.613	4.586	4.663	44.071
Fase 12	<i>Kton</i>	3.106	4.624	6.985	10.502	9.869	7.904	9.868	9.830	9.403	10.109	10.877	10.956	104.034
KTPD Mina	<i>KTPD</i>	698	746	731	846	769	761	744	749	743	758	859	799	767
Tonelaje Procesado Planta	<i>Kton</i>	4.734	3.743	3.415	3.417	3.580	4.632	3.963	4.814	4.302	4.814	4.620	4.180	50.215
Toneladas por día Planta	<i>KTPD</i>	153	134	110	114	115	154	128	155	143	155	154	135	138
Rendimiento Planta	<i>TPH</i>	6.597	6.605	5.040	4.998	5.047	6.581	6.563	6.614	6.582	6.614	6.608	6.594	6.196
Utilización Planta	%	96,45%	84,33%	91,07%	94,96%	95,35%	97,76%	81,16%	97,83%	90,77%	97,83%	97,10%	85,21%	92,52%
Ley As	<i>ppm</i>	148,8	207,1	240,6	173,4	162,5	148,8	204,3	112,3	86,7	121,8	117,1	110,2	148,9
Ley Alim. Cu	%	1,07%	1,13%	1,33%	1,23%	1,42%	1,23%	1,42%	1,21%	1,34%	1,23%	1,34%	1,44%	1,28%
Rec. Cu	%	84,8%	86,0%	86,7%	86,8%	86,6%	87,0%	85,5%	86,4%	85,6%	86,0%	86,8%	87,7%	86,4%
Conc Cu Producido	<i>Kton</i>	156	132	144	133	160	181	174	183	180	186	196	192	2.016
Ley Conc. Cu	%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%	27,50%
Ley As Conc	<i>ppm</i>	4.167	5.799	6.738	4.856	4.550	4.165	5.720	3.144	2.427	3.410	3.278	3.086	4164,7
Ley Alim. Mo	<i>ppm</i>	129	153	117	155	200	242	229	244	372	308	364	381	247
Conc Mo Envasado	<i>ton</i>	0	0	0	0	552	928	987	1.361	2.259	1.814	2.620	2.397	12.918
Ley Conc. Mo	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	29,3%	31,2%	30,3%	31,3%	34,0%	33,3%	34,0%	34,2%	33,0%

9.2 Extracto Plan Quinquenal Collahuasi

	QUINQUENIO 2020 - 20024					
	2020	2021	2022	2023	2024	
	2020	2021	2022	2023	2024	TOTAL
Días	366	365	365	365	366	1.827
Días operativos	357	356	356	356	357	1.782
Mineral Rosario a Planta [kt]	45.394	51.783	55.867	50.218	54.446	257.708
Mineral Rosario a Stock Alta Ley [kt]	16.064	14.874	12.354	-	-	43.292
Mineral Rosario a Stock Baja Ley [kt]	24.282	64.422	10.087	18.085	11.145	128.020
Oxidos/Mixtos Rosario [kt]	121	155	2.115	365	2.164	4.920
Esteril Rosario [kt]	179.676	148.373	199.196	211.477	212.072	950.795
Total Extraído ROSARIO [kt]	265.538	279.607	279.618	280.145	279.827	1.384.735
Remanejo Sulfuros [kt]	7.055	4.450	3.110	8.767	6.430	29.812
Remanejo Operativo [kt]	6.112	8.550	9.891	4.233	6.570	35.355
Muro Tranque [kt]	16.798	14.376	21.135	20.359	20.359	93.026
MOVIMIENTO TOTAL [kt]	295.502	306.984	313.753	313.504	313.186	1.542.929
Razon E/M Rosario	3,32	3,19	3,10	4,58	4,14	3,60
Ley de corte CuT [%]	0,99	0,76	0,83	0,70	0,50	0,75
Mineral a Planta [kt]	52.449	56.233	58.977	58.985	60.876	287.521
KTPD Planta	143	154	162	162	166	157,37
TPH Planta	6.590	6.746	7.107	7.104	7.476	7.006
HSAG	7.959	8.336	8.298	8.304	8.143	41.039
Ley CuT Mineral [%]	1,31	1,25	1,10	1,11	1,13	1,18
Ley CuS Mineral [%]	0,06	0,06	0,04	0,06	0,07	0,06
Ley Mo Mineral [ppm]	327	292,79	311,39	222,08	144,19	256,83
Ley As Mineral [ppm]	112	108,05	44,55	112,66	164,23	108,53
Ley Au Mineral [g/t]	0,09	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07
Ley Ag Mineral [g/t]	5,78	5,83	3,96	4,55	3,64	4,71
Ley FeT Mineral [g/t]	3,35	3,38	3,34	3,52	4,11	3,55
Ley Concentrado Cu [%]	27,5%	27,5%	27,5%	27,5%	27,5%	27,5%
Ley Concentrado Mo [%]	36,01%	35,1%	37,7%	32,9%	27,5%	33,82%
Produccion Concentrado Cu [t]	2.191.203	2.229.915	2.046.298	2.060.407	2.158.962	10.686.786
Produccion Concentrado Filtrado Cu [t]	2.177.981	2.211.043	2.026.592	2.044.843	2.147.767	10.608.226
Produccion Concentrado Mo [t]	13.222	18.873	19.706	15.565	11.194	78.560
Cu Fino Rec [t]	602.581	613.227	562.732	566.612	593.714	2.938.866
Producción Cu Fino Filtrado [t]	602.237	612.736	562.220	566.207	593.423	2.936.824
Ley de concentrado de Moly [%]	36,0%	35,1%	37,7%	32,9%	27,5%	34,38%
Producción de Moly [t]	4.762	6.624	7.426	5.120	3.078	27.010
Ley Cu en Mo [%]	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%	2,6%
As Conc	2.513	2.482	981	2.478	3.941	2.496