



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**EVALUACIÓN DE DRONES COMO EQUIPO DE CARGUÍO Y  
TRANSPORTE DE MATERIAL DE MINA A CIELO ABIERTO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**BRAYAN ARGENES FONSECA FERNÁNDEZ**

PROFESOR GUÍA

Dr. MANUEL REYES JARA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Dr. NELSON MORALES VARELA

Dr. MATTHEW BARDEEN

CURICÓ – CHILE

**2020**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## Resumen

En minería a cielo abierto, principalmente en la extracción de minerales metálicos, las operaciones unitarias de carguío y transporte representan entre un 45% a 65% de los costos operacionales, mientras que los costos en obras civiles tales como rampas y caminos representan un 15%. A medida que se avanza en la extracción mineral, las distancias y tiempos de ciclo de los equipos de transporte aumentan considerablemente, generando un déficit en el ritmo de producción programado en el plan minero. Para poder mantener la producción se debe invertir en una flota mayor de equipos. Por lo que nace la necesidad de evaluar la factibilidad de nuevos equipos de transporte que cumplan con la producción y que sean rentables.

La presente memoria tiene como metodología evaluar la factibilidad del uso de drones como equipo de transporte en un rajo sin rampas. Se dimensionará una flota de equipos convencionales para cierto ritmo de producción, así mismo se calculará la flota de drones necesarios para cumplir con la misma capacidad de producción mineral, posterior a eso se evaluarán los costos asociados a cada flota, y por último se comparará en términos económicos, el diseño de mina convencional y el diseño de mina sin rampas para drones.

Los resultados muestran que en el diseño sin rampas se debe remover un 38% menos de estéril respecto al diseño convencional. Los tiempos de ciclo son un 74% menores en el caso de transportar material con aeronaves, sin embargo su productividad es menor.

En relación a los resultado obtenidos se puede concluir que una operación minera a cielo abierto es económicamente factible con drones. Si bien la operación convencional tiene mayores ganancias, esta diferencia podría ser positiva para el dron realizando mejoras de capacidad de carga y/o reduciendo el consumo de combustible por hora de vuelo. Se recomienda investigar la factibilidad de explotar una mina con una flota mixta, en donde el dron tenga mayor participación a grandes profundidades, mientras que el camión minero sea utilizado más cercano a superficie.

## **Abstract**

In open pit mining, mainly in the extraction of metallic minerals, unit operations cargo and transport represent between 45% to 65% of operational costs, while costs in civil works such as ramps and roads represent 15% . As the mineral extraction progresses, the distances and cycle times of the transport equipment increase considerably, generating a deficit in the production rate programmed in the mining plan. In order to maintain production, must be invest in a larger fleet of equipment. So the need arises to assess the feasibility of new transportation equipment that meets production and is profitable.

The purpose of this report is to evaluate the feasibility of using drones as transport equipment in a open pit without ramps. A fleet of conventional equipment will be dimensioned for a certain production rate, and the drone fleet necessary to meet the same mineral production capacity will be calculated,after will be the costs associated to each fleet will be evaluated, and finally it will be compared in economically, conventional mine design and mine design without ramps.

The results show that in the design without ramps, 38% less waste must be removed compared to the conventional design. Cycle times are 74% less in the case of transporting material with unmanned aircraft, however their productivity is lower.

In relation to the results obtained, it can be concluded that an open pit mining operation is economically feasible with drones. Although the conventional operation has higher profits,This difference could be positive for the drone if cargo capacity is improved and / or fuel consumption per hour of flight is reduced. It is recommended to investigate the feasibility of exploiting a mine with a mixed fleet, where the drone has a greater participation at great depths, while the mining truck is used closer to the surface.

## **Agradecimientos**

Al finalizar esta memoria, quiero agradecer enormemente a todas la persona que de una u otra manera han aportado en esta etapa de mi vida, a mis amigos de universidad, que hicieron más grata la estadía en estos años, a mis hermanas, cuñado y sobrinita por siempre entregar buena onda. Agradecerles a mi Madre y Padre por su apoyo incondicional y sus buenos consejos. Finalmente agradecer a Jocy por su compañía, buenas energías y su gran amor, y por supuesto a su bella familia.

Para terminar, agradecer a mi profesor guía Dr. Manuel Reyes por su ayuda y colaboración a lo largo de este trabajo, y a la Escuela de Ingeniería Civil de Minas por entregarme los conocimientos necesarios para culminar este largo y bonito proceso.

*Dedicado a mi Madre, Padre y a mi amor Jocy.*

# Índice de contenido

Introducción.....	1
Problematización .....	1
Objetivos.....	2
Objetivo General .....	2
Objetivos específicos.....	2
Alcances .....	3
Marco Teórico .....	4
Minería a Cielo Abierto .....	4
Submétodos .....	4
Cortas.....	4
Descubiertas.....	5
Terrazas .....	6
Contorno .....	6
Canteras .....	7
Graveras.....	8
Minería Hidráulica.....	8
Planificación Minera.....	9
Planificación de Largo Plazo.....	10
Optimización .....	11
Diseño de Fases .....	12
Programación de la Producción.....	12
Valorización del Plan Minero.....	12
Reservas Mineras .....	13
Vida de la Mina.....	14
Leyes de corte.....	15
Carguío y Transporte .....	16
Selección de Equipos .....	16
Ritmo Óptimo de Explotación (ROE) .....	16
Recorrido del Transporte.....	17
Tiempo de Ciclo .....	17
Capacidad .....	19

Flota de equipos.....	19
Dron .....	22
Tipos de dron.....	22
Multirrotores.....	22
Helicópteros.....	23
Ala fija.....	23
Aplicaciones de drones en minería.....	24
Prospección.....	24
Topografía .....	24
Control de operaciones .....	25
Monitoreo de estructuras .....	25
Control medioambiental.....	25
Servicios de emergencias y rescate .....	25
Simulación .....	25
Metodología.....	27
Datos .....	27
Software .....	27
Procedimiento .....	28
Resultados.....	30
Caso de estudio .....	30
Diseño para equipos convencionales .....	30
Destinos.....	32
Plazo de proyecto .....	33
Flota de transporte y carguío para <i>pit</i> óptimo .....	34
Desplazamiento .....	35
Tiempo de ciclo.....	36
Flota de equipos .....	38
Operaciones unitarias con drones .....	39
Diseño para operación con dron .....	41
Destinos.....	42
Plazo de proyecto .....	42
Flota de drones.....	43
Desplazamiento .....	44



Tiempo de ciclo.....	45
Flota de equipos .....	46
Simulación .....	47
Evaluación económica .....	53
Inversión.....	53
Ingreso.....	54
Egresos .....	55
Flujo de caja .....	59
Análisis de resultados .....	61
Análisis del diseño .....	61
Análisis de flota de equipos .....	62
Análisis de evaluación económica .....	63
Conclusiones y recomendaciones.....	65
Conclusiones.....	65
Recomendaciones .....	66
Bibliografía.....	67
Apéndice.....	69

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Diseño de extracción Cortas (Herrera, 2006).....	5
Ilustración 2: Descubierta de Carbón (Herrera, 2006) .....	6
Ilustración 3: Método de Explotación Terrazas (Herrera, 2006).....	6
Ilustración 4 Método Contorno (Herrera, 2006).....	7
Ilustración 5: Cantera de Roca Ornamental (Herrera, 2006).....	7
Ilustración 6: Gravera de áridos (Herrera, 2006).....	8
Ilustración 7: Dragas, Equipo Utilizado en Minería Hidráulica (Herrera, 2006).....	8
Ilustración 8: Tiempo de ciclo de transporte (Elaboración propia) .....	18
Ilustración 9: Tiempo de ciclo de carguío (Elaboración propia) .....	18
Ilustración 10: Dron Cuadricóptero Mavic 2 Pro (DJI, 2020).....	23
Ilustración 11: Dron Helicóptero VAPOR 55 (AeroVironment, 2020) .....	23
Ilustración 12: Dron Ala fija UX11 (Delair, 2020) .....	24
Ilustración 13: Vista en planta de pit óptimo (elaboración propia) .....	31
Ilustración 14: Diseño operativo del pit final (elaboración propia) .....	32
Ilustración 15: Alza contenedor multinorma OCTB-1124 (Mecalux logismarket, 2020) ...	40
Ilustración 16 Diseño operativo del pit para dron, vista en planta (elaboración propia).....	41
Ilustración 17 Vista transversal del rajo con y sin rampas (elaboración propia)* .....	41
Ilustración 18: Dron e.Yo Copter modelo One Tone (e.Yo Copter, 2018) .....	43
Ilustración 19: Modelo para simulación de equipos (elaboración propia) .....	49

## Índice de tablas

Tabla 1	Parámetros de entrada pit optimiser .....	31
Tabla 2	Características de diseño del rajo .....	32
Tabla 3	Categorización del material mover en pit .....	33
Tabla 4	Características de Camión minero CAT 789D .....	34
Tabla 5	Características de pala hidráulica CAT 6030Fs .....	35
Tabla 6	Distancias y velocidades según destino .....	35
Tabla 7	Tiempo de ciclo de pala hidráulica CAT 6030FS .....	36
Tabla 8	Variables que determinan balde efectivo de CAT 6030FS .....	37
Tabla 9	Variables que determinan tolva efectiva de CAT 789D .....	37
Tabla 10	Tiempo de ciclo de camión CAT 789D .....	38
Tabla 11	Categorización del material mover en pit para dron .....	42
Tabla 12	Características de dron e.Yo Copter one tone .....	43
Tabla 13	Características de minicargador Bobcat S650 .....	44
Tabla 14	Distancias y velocidades para rajo convencional .....	44
Tabla 15	Distancias y velocidades para rajo sin rampas .....	44
Tabla 16	Tiempo de ciclo de minicargador Bobcat S650 .....	45
Tabla 17	Variables que determinan balde efectivo de Bobcat S650 .....	45
Tabla 18	Variables que determinan carga efectiva de dron .....	46
Tabla 19	Tiempo de ciclo dron en rajo con/sin rampa .....	46
Tabla 20	Resultado de flota de equipos para rajo con y sin rampa .....	47
Tabla 21	Recursos utilizados por proceso y equipo .....	49
Tabla 22	Tiempo en cola por equipo y proceso .....	50
Tabla 23	Tiempo no productivo por equipo y proceso .....	50
Tabla 24	Equipos que pasaron por procesos no productivos y colas .....	51
Tabla 25	Tiempo acumulado sin utilizar productivamente los equipos .....	52
Tabla 26	Porcentaje de utilización por equipo .....	52
Tabla 27	Flota real después de simulación de acuerdo a la utilización experimental .....	53
Tabla 28	CAPEX de equipos en operaciones unitarias convencionales .....	53
Tabla 29	Depreciación de equipos mineros convencionales .....	54

Tabla 30 CAPEX de equipos en operaciones unitarias con drones .....	54
Tabla 31 Depreciación de equipos para operación con drones .....	54
Tabla 32 Ingreso anual por venta de cobre de cada proyecto .....	55
Tabla 33 Consumo y costos de combustible por equipo .....	56
Tabla 34 Costo anual por mantenimiento de flota .....	57
Tabla 35 Costo anual de mantenimiento .....	57
Tabla 36 Resultado de costo mina para diseño sin rampas .....	58
Tabla 37 Egreso anual por operación de cada proyecto .....	58
Tabla 38 Flujo de caja anual por operación .....	59
Tabla 39 VAN de operación convencional y con drones .....	60
Tabla 40 Indicadores económicos según operaciones unitarias .....	60

## Índice de apéndices

Apéndice 1: Tabla con detalle del desplazamiento de camión por banco .....	69
Apéndice 2: Tabla con detalle del desplazamiento de dron en rajo con rampas. ....	70
Apéndice 3: Tabla con detalle del desplazamiento de dron en rajo sin rampas. ....	71
Apéndice 4: Datos utilizados en simulación de camiones.....	72
Apéndice 5: Datos utilizados en simulación de drones. ....	73
Apéndice 6: Diagrama de simulación de camiones en software Arena. ....	74
Apéndice 7: Diagrama de simulación de drones en software Arena. ....	75
Apéndice 8: Flujo de caja proyectado a 10 años para proyecto con camiones. ....	76
Apéndice 9: Flujo de caja proyectado a 10 años para proyecto con drones. ....	77

# **Introducción**

## **Problematización**

La minería consiste en extraer un material natural de la tierra para posteriormente generar ganancias. Existen operaciones unitarias que son la base para la explotación mineral, las cuales son Perforación, Tronadura, Carguío y Transporte (Le-Feaux, Galdames, & Vázquez, 2008).

La importancia del proyecto radica en que Carguío y Transporte son operaciones que representan entre el 45% y 65% de los costos operacionales totales de explotación de una mina (Tapia, 2017). Esto quiere decir que, si existe una mejora en estas operaciones, habrá una disminución notable en los costos operacionales del proyecto.

Por otra parte, al momento de seleccionar los equipos de carguío y transporte se debe considerar una compatibilidad física entre los equipos, es decir que el equipo de carguío sea capaz de cargar al equipo de transporte sin mayores inconvenientes tales como diferencia de altura de carga/descarga, paladas por equipo de transporte. Además, debe existir compatibilidad física de los equipos con la explotación, es decir que sean capaces de operar en la faena minera en condiciones estándar de operación y seguridad (Tapia, 2017).

En minería a cielo abierto, a medida que se avanza en el tiempo la explotación se vuelve cada vez más compleja la operatividad de los equipos de carguío y transporte. El área de trabajo del equipo de carguío se reduce, por su parte las distancias y tiempos de ciclo de los equipos de transporte aumentan considerablemente. Además, es importante destacar que el diseño de mina, el cual incluye restricciones tanto geomecánicas como de operación, tiene directa relación con la elección y cantidad de flota de equipos, por lo que si existe una mejora en la extracción del mineral, el diseño podrá tener un mayor valor económico, maximizando la búsqueda del mineral y minimizando la extracción de estéril. Debido a esto nace la necesidad de evaluar equipos alternativos que sustituyan los equipos convencionales y que puedan generar mejoras tales como maximizar el valor económico de mina la y disminuir costos en flota de equipos, aumentar el rendimiento y producción de la operación.

# **Objetivos**

## **Objetivo General**

Evaluar la factibilidad económica del uso de drones para satisfacer los requerimientos de carguío y transporte de material en una mina a cielo abierto.

## **Objetivos específicos**

Dimensionar flota de equipos de carguío y transporte tradicional que cumpla con cierta capacidad.

Calcular flota de drones en términos de capacidad de carga, que iguale a la de transporte tradicional.

Evaluar costos asociados a flota de carguío y transporte convencional y flota de drones.

Comparar en términos económicos, diseño de mina con carguío y transporte tradicional versus diseño de mina utilizando drones.

## Alcances

La presente memoria tiene ciertos alcances que son importantes mencionar para entender de mejor manera el estudio realizado, los cuales son:

- El estudio es en base a un modelo de bloques específico. El modelo de bloques solo cuenta con leyes de cobre, es decir los resultados de ingresos serán solo en función de este metal y no se consideran subproductos. Además, el precio del cobre a utilizar es un estimado para el presente año.
- La selección del dron fue realizada en abril del presente año, por ende no contempla innovaciones posteriores del modelo u otro modelo emergente.
- No se consideran características geomecánicas al momento del diseño, la única consideración es el ángulo de banco ( $65^\circ$ ) y la densidad del material.
- Los datos de factores operacionales de los equipos para cálculo de flota fueron determinados mediante un estudio de mercado en la web abierta.
- El proceso posterior al destino del material (botadero, *stock pile* y planta) no es caso de estudio de la presente memoria, solo se considera costo de planta y costo de venta para realizar cálculos como *pit* óptimo, leyes de corte e ingresos netos.
- La granulometría de tronadura y su impacto económico no son parte del caso estudio.



# **Marco Teórico**

## **Minería a Cielo Abierto**

La minería de acuerdo con los autores Newman, Rubio, Caro, Weintraub & Eureka (2010) es el proceso de extraer un material natural de la tierra para obtener ganancias.

Según Newman et al. (2010), la minería a cielo abierto es un método útil para extraer minerales que se encuentran cerca de la superficie, y en comparación con la minería subterránea es más antigua. Debido a que no existía la tecnología para explorar minerales a grandes profundidades.

### **Submétodos**

Existen distintos submétodos de explotación a cielo abierto, los cuales dependen las características estructurales del yacimiento y las aplicaciones del mineral, entre estos se encuentran: Cortas, Descubierta, Terrazas, Contorno, Canteras, Graveras y Minería Hidráulica (Herrera, 2006).

#### **Cortas**

Las cortas son explotaciones que se llevan a cabo de manera tridimensional mediante banqueo descendente, con secciones de forma troncocónicas. Este método es comúnmente asociado a la minería metálica, aunque también existen yacimientos de carbón que lo utilizan (Herrera, 2006).

Las cortas mineras presentan los siguientes escenarios:

- Yacimiento masivo de gran profundidad, de capas inclinadas, de rocas o minerales de baja ley. Esto obliga a profundizar en la excavación para

extraer el mineral de interés, que debido al buzamiento del yacimiento queda a mayor profundidad.

- La extracción se produce tridimensionalmente por banqueo descendente, son secciones verticales en forma troncocónica y un gran número de bancos.
- La explotación se realiza en roca dura, resistente y en alguno caso abrasiva, es por esto que se necesita la tronadura como mecanismo para arrancar el material.
- En este método es necesario tener depósitos exteriores a la mina (botadero) para ubicar el material estéril. Los botaderos reciben gran cantidad de material debido a que las explotaciones en muchos casos superan los 300 metros de profundidad.

Estos tipos de explotaciones en general tienen una vida superior a los 15 años, en algunos casos en minería metálica llega a durar más de 100 años la extracción mineral (Herrera, 2006).

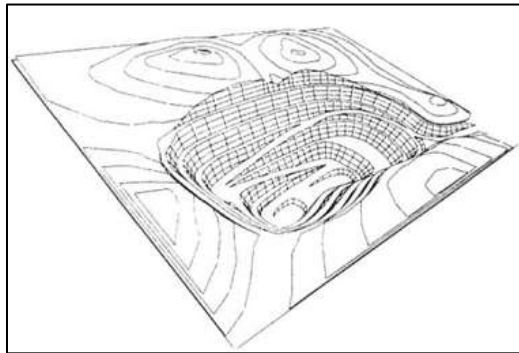


Ilustración 1: Diseño de extracción Cortas (Herrera, 2006)

## **Descubiertas**

Estas técnicas de extracción se realizan en yacimientos horizontales, con recubrimientos de estéril de alrededor de 50 metros. Consiste en extraer el mineral en un solo banco en una dirección, a medida que se avanza la explotación de manera horizontal se va rellenando la fase anterior con el material estéril extraído en la fase actual (Herrera, 2006).

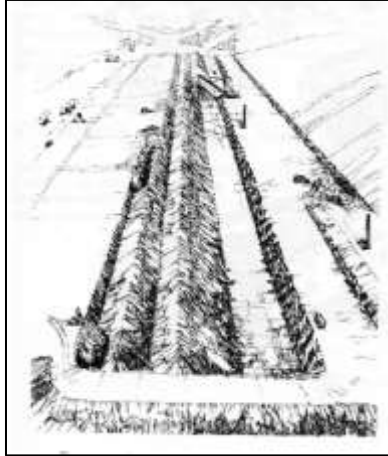


Ilustración 2: Descubierta de Carbón (*Herrera, 2006*)

## Terrazas

Es un método de explotación mediante bancos de yacimiento sub horizontales, los cuales se extraen en una dirección. Este proceso puede alcanzar grandes profundidades, a diferencia del método anterior que solo es posible con un banco, siendo la utilidad económica la limitante que más predomina. Además, este método permite rellenar los huecos dejados por la extracción del material, lo cual posibilita actuar de mejor manera la restauración del terreno (*Herrera, 2006*).

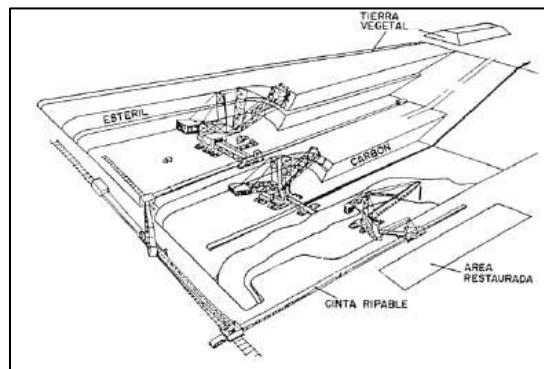


Ilustración 3: Método de Explotación Terrazas (*Herrera, 2006*)

## Contorno

Método utilizado en yacimientos de carbón con capas horizontales o sub horizontales, con poca potencia y con dificultades para acceder a explotar. Este método radica en extraer, tanto el mineral como el estéril en sentido transversal al afloramiento (*Herrera, 2006*).



Ilustración 4 Método Contorno (Herrera, 2006)

## Canteras

Este método hace referencia a la explotación de rocas, las cuales son utilizadas como materia prima para la elaboración de materiales de construcción o simplemente como material que va dirigido directamente a la construcción sin una elaboración posterior. La extracción se realiza mediante banqueo, donde se puede extraer material fragmentado o en grandes bloques, esto dependerá de su uso final (Herrera, 2006).

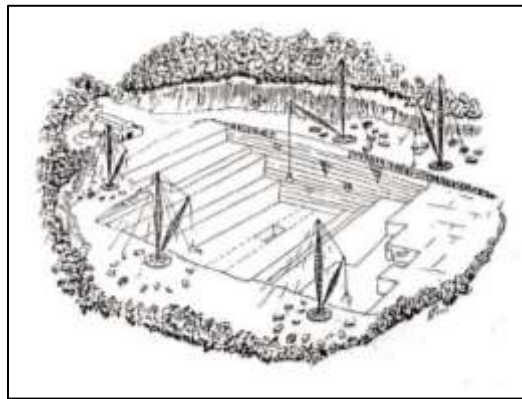


Ilustración 5: Cantera de Roca Ornamental (Herrera, 2006)

## Graveras

En valles y terrazas de ríos, se depositan arenas y gravas, dichos materiales son aquellos que se explotan mediante graveras. El método consiste en extraer el material, con poca dureza, con tan solo equipos mecánicos, mediante bancos que comúnmente no superan los 20 metros (Herrera, 2006).

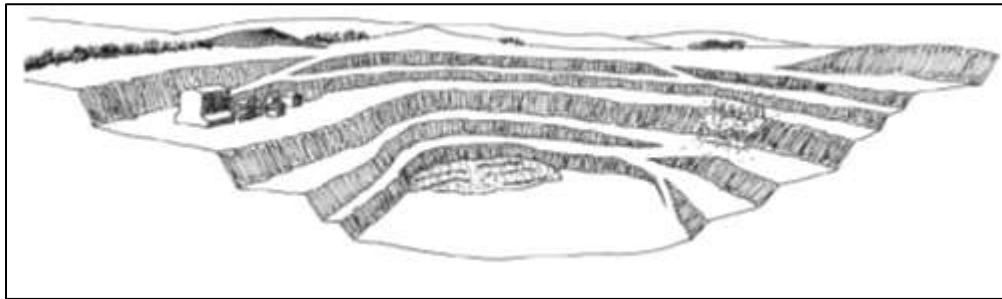


Ilustración 6: Gravera de áridos (Herrera, 2006)

## Minería Hidráulica

Método utilizado para depósitos de oro generados por aluviones. La explotación consiste en inundar el depósito y mediante un equipo llamado draga se extrae a la superficie el mineral que está por debajo del nivel del agua. El método es económico, ya que el proceso de concentración es de separación por gravedad (Herrera, 2006).

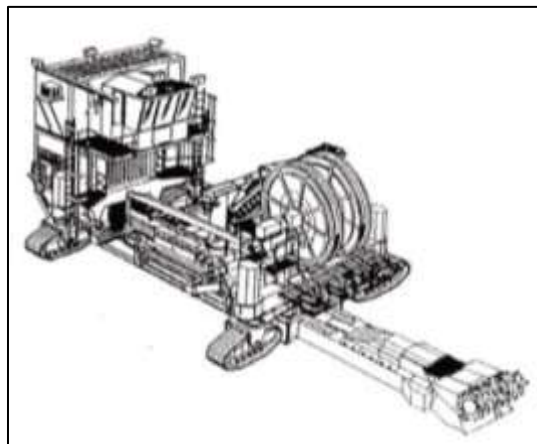


Ilustración 7: Draga, Equipo Utilizado en Minería Hidráulica (Herrera, 2006)

## Planificación Minera

Para Newman et al (2010) dentro del proceso minero se puede destacar varias etapas importantes, las cuales son:

**Prospección:** se lleva a cabo con el fin de conocer de manera general el área de interés mineral. Se buscan anomalías geológicas en la superficie en donde existiría un depósito mineral con mayor probabilidad.

**Exploración:** exploración es la etapa que se centra en detallar el depósito mineral descubierto en la prospección. La información es recaudada por medio de la perforación de sondajes diamantinos y muestreos con el fin de generar un modelo geológico y de recursos del depósito.

**Desarrollo:** luego de realizar el estudio de prefactibilidad se procede a la evaluación de proyecto. Donde se define el pit final, capacidad de planta, tipo de procesamiento, estimar reservas, desarrollar planificación minera, determinar equipos y flota, infraestructura, inversiones, costos de operación y comercialización, flujo de caja y rentabilidad del proyecto. Además se deben considerar temas legales, sociales y ambientales dentro de esta evaluación. Posterior al resultado de la evaluación de proyecto con resultados positivos económicos, sociales, ambientales y legales, la empresa decide si invierte en el proyecto minero. La etapa de desarrollo y construcción, consiste en fundar todas las obras requeridas tales como plantas de procesamientos, taller mecánico, campamentos mineros, abastecimientos energéticos entre otros, para que se lleve a cabo la extracción del material.

**Explotación:** consiste en extraer el mineral, cargar y transportar el mineral, procesarlo y comercializarlo. En esta etapa también se extrae material que es considerado estéril, el cual es llevado a botadero, también existe material que va dirigido a stock pile, esto dependerá de los requerimientos en los planes de producción previamente establecidos.

**Cierre de faenas:** consiste en el desmantelamiento de las instalaciones, la recuperación de las formas físicas del lugar explotado, reforestación, monitoreo constante de tranques de relaves y trataminetos de efluentes de la mina.

En la etapa de desarrollo es donde se realiza la planificación minera, la cual define cómo se extraerá el material y que es lo que se hará con el material extraído. En la planificación se decide que equipos utilizar, cuantos usar y como se van a usar (Newman, et al., 2010).

De acuerdo con Rubio (2008), la planificación se puede dividir en horizontes para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero, donde podemos encontrar la planificación de corto plazo, de mediano plazo y de largo plazo.

La planificación de corto plazo es aquella que analiza los recursos utilizados en la operación minera y además recopila y utiliza la información operacional de modo de retroalimentar la planificación de mediano plazo (Rubio, 2008).

La planificación de mediano plazo produce planes de producción que guían a la operación para alcanzar las metas definidas en el largo plazo (Rubio, 2008).

La planificación de largo plazo define una envolvente económica en función de las reservas mineras disponibles, con esto se puede establecer un plan minero anual, se determina el tamaño de la mina, el método de explotación, capacidad de producción, agendamiento de explotación y las leyes de corte. Las variables utilizadas son más bien generales y promedio, debido al tamaño del problema no se entrega una solución de gran detalle (Vargas, 2011).

### **Planificación de Largo Plazo**

Para Parra (2015) el plan minero de largo plazo es donde se establece un plan de acuerdo a los objetivos estratégicos de la compañía minera. Se describe la vida de la mina, el qué, cuánto y cómo se extraerá el mineral, la cual tiene gran incertidumbre. Este tipo de plan se realiza en períodos anuales, donde los primeros 3 años abarcan periodos trimestrales. Además, en este tipo de plan se definen los siguientes aspectos: Reservas minerales, Vida de la mina, leyes de corte, estimación de inversión relacionada a la planta de procesamiento mineral, flota de equipos requeridos por período, y secuencia anual de explotación por fase y banco.

Los planes de largo plazo abarcan las siguientes etapas: optimización, diseño de fases, programas de producción y evaluación de planes.

## Optimización

Primero, se tiene un modelo de bloques, donde cada uno de los bloques esta valorizado de acuerdo a la Ecuación 1, asumiendo costos y precios fijos. Luego, de acuerdo al algoritmo de Lerchs y Grossman se comprueba si el valor económico de un bloque de mineral permite la extracción de bloques de estéril precedentes, con esto se obtiene el pit final (Díaz, 2017) (Parra, 2015).

$$B = \text{máx} \left\{ \begin{array}{l} [(P - Cr) \times R \times L \times F - Cm - Cp] \times T \\ -Cm \times T \end{array} \right\}$$

Donde:

$P$  = Precio de venta

$Cr$  = Costo de refinación y Venta

$R$  = Recuperación metalúrgica

$L$  = Ley de metal contenido en mineral

$F$  = Factor de conversión de unidades

$Cm$  = Costo mina

$Cp$  = Costo planta

$T$  = Tonelaje

Luego de obtener el pit final, se procede a calcular los pits anidados, para esto se utiliza un factor multiplicador, llamado *revenue factor*, el cual multiplica el precio del metal proyectado inicialmente (Castillo, 2009). Con esto se obtienen pits que potencialmente podrían ser pit final si cumplen con ciertas restricciones (Vargas, 2011).

Posteriormente, se realiza una evaluación económica de los pits anidados, restringiendo estos con capacidad de procesamiento de mineral y de movimiento total, tasa de descuento e inversiones a realizar.

Finalmente, la elección del pit final se consideran los objetivos estratégicos de la compañía minera, así como el criterio del planificador.



## **Diseño de Fases**

Finalizada la etapa de optimización y elección del pit final, se procede a realizar el diseño de fases. El diseño debe cumplir con requerimiento geomecánicas de operación, donde se debe considerar los componentes geométricos del talud. En esta etapa se busca operativizar el rajo, lo cual conlleva a considerar una rampa para el acceso de equipos que realizan las operaciones unitarias (Parra, 2015).

## **Programación de la Producción**

Cuando ya se eligieron las fases que conforman el pit final, se determina la cantidad óptima de movimiento de mina total y la cantidad enviada a planta por periodo. El cálculo de la cantidad óptima se realiza mediante *software*, puede ser en Wittle, Vulcan o Doopler, donde se pueden ver distintos escenarios tales como *worst case* o *best case*, estos *softwares* buscan un equilibrio y un balance de la producción mina y la planta de procesamiento.

En la última etapa se genera un agendamiento más detallado, donde se declara que material va a planta, stock y botadero, además define detalles tales como cuantas palas y camiones o equipos en general, deben trabajar por fase. En general afina los detalles para que sea completamente operativo al plan minero (Parra, 2015).

## **Valorización del Plan Minero**

De acuerdo con Parra (2015) luego de realizar las etapas anteriores, se pasa a valorizar el plan minero de acuerdo a algún indicador económicos, como es el caso de reservas mineras o puede ser otro criterio, esto dependerá de la estrategia que tenga la compañía minera. A continuación, se da una breve explicación de Valor Presente Neto como indicador para la valorización de los planes mineros.

### **Valor Presente Neto (VPN o VAN)**

“El valor presente neto de un proyecto, cualquiera sea la industria de la que se esté hablando es un indicador que permite llevar los flujos de caja a un valor presente.” (Parra, 2015, pág. 26) . Se puede mostrar de forma simplificada como se muestra en la Ecuación 2.

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{-I_t + (it - ct)}{(1 + r)^t}$$

Donde:

$I_0$  = Inversión en el año cero

$I_t$  = Inversión en el año t

$it$  = Ingresos en el año t

$ct$  = Egresos en el año t

$r$  = tasa de descuento

Es importante mencionar que existen varios tipos de indicadores financieros, el VPN es uno de los que se utiliza en la industria minera, pero existen otros que también te ayudan al momento de evaluar un proyecto. Como se dijo anteriormente, depende de los objetivos estratégicos de la compañía minera que tipo de indicadores se va a utilizar.

## **Reservas Mineras**

Determinar las reservas mineras tiene como objetivo evaluar los recursos geológicos que son potencial y económicamente extraíbles. Para establecer las reservas mineras es necesario incluir conceptos como el tiempo y restricciones operacionales que están presentes al momento de acceder y extraer el mineral. Cabe destacar que las reservas mineras son notificadas en el plan minero de largo plazo (Parra, 2015).

Durante el largo de la vida de la mina van surgiendo variaciones en el inventario de reservas mineras debido a que se actualizan los recursos geológicos ya que existe nueva información, actualización de información geomecánica lo cual es muy relevante en minería a cielo abierto ya que pueden variar los ángulos de talud, y por último se encuentra la incertidumbre de los precios de venta, costos operacionales, tasas de descuento de largo plazo y nuevas tecnologías (Parra, 2006).

## Vida de la Mina

Determinar la vida de la mina es fundamental, debido a que si se extrae el mineral con ritmos bajos genera ingresos lentos, mientras que si el ritmo de producción es demasiado rápido puede que se necesite una inversión de gran envergadura y esto se traduce a un alto riesgo económico (Toledo, 2010).

Para determinar la vida óptima de una mina a cielo abierto existen distintos métodos donde destacan las siguientes fórmulas empíricas:

Primero está la regla de H.K Taylor (1976), de acuerdo con el autor, se puede utilizar para cualquier tipo de yacimiento mineral sin importar el método de explotación. La fórmula de Vida Optima de Explotación (VOE) se puede ver a continuación (Ecuación 3):

$$VOE = 6,5 \times \sqrt[4]{RM}$$

Donde:

*VOE* = Vida Optima de Explotación [años]

*RM* = Reservas Mineras [Mton]

Luego tenemos la fórmula propuesta por un ingeniero canadiense, Brian Mackenzie (1982), el cual propuso una fórmula similar a la de Taylor, pero Mackenzie hizo diferencia entre el método subterráneo y a cielo abierto. A continuación, en la Ecuación 4 se presenta la expresión de Mackenzie para el Ritmo Optimo de Explotación (ROE) para un yacimiento a cielo abierto y que no supere los 60 Mton/año.

$$ROE = 5,63 \times RM^{0,756}$$

Donde:

*ROE* = Ritmo Optimo de Explotación [ton/año]

*RM* = Reservas Mineras [ton]

Por último, tenemos a López Jimeno (1986), el cual realizó diversos análisis de regresión lineal con datos extraídos de explotaciones mineras de metales. Ajustó curvas del tipo potencial  $y = a * x^b$  donde  $y$  es la vida de explotación y  $x$  las reservas mineras. A continuación, en la Ecuación 5, se muestra la expresión final que obtuvo López:

$$VOE = 5,35 \times RM^{0,273}$$

Donde:

$VOE$  = Vida Optima de Explotación [años]

$RM$  = Reservas Mineras [Mton]

### Leyes de corte

Al momento de evaluar el yacimiento, se define una ley la cual define el destino del bloque. La ley de corte crítica es la que define el límite económico de la explotación, es decir, la ley de corte critica es aquella que como mínimo paga los costos asociados a la extracción, procesamiento y venta, donde se pueden diferenciar bloques mineralizados y bloques de estéril, los que pagan sus costos y los que no respectivamente (Díaz, 2017) (Jélvez, 2017). A continuación, se puede ver la expresión (Ecuación 6) que ejemplifica lo dicho anteriormente:

$$LCC = \frac{Cm + Cp}{(P - Cv) \times R \times F}$$

$$LCM = \frac{Cp}{(P - Cv) \times R \times F}$$

Donde:

$LCC$  = Ley de Corte Crítica

$LCM$  = Ley de Corte Marginal

$Cm$  = Costo mina

$Cp$  = Costo planta

$P$  = Precio de venta

$Cv$  = Costo de refinación y Venta

$R$  = Recuperación metalúrgica

$F$  = Factor de conversión de unidades

Como se mencionó anteriormente, dentro del cálculo del pit final, se evalúa si la extracción de un bloque con mineral de más profundidad paga los bloques antecesores necesarios para la extracción del mineral. Con esto se tiene que los bloques considerados estéril tienen pagada su extracción con los bloques mineralizados, por lo que, si pueden pagar los costos asociados

a procesamiento y venta, no convendrá destinarlos a botaderos, si no a un stock pile para su posterior procesamiento de mineral. Es así como se define la ley de corte marginal, la cual se representa en la Ecuación 7.

## **Carguío y Transporte**

La operación de carguío y transporte, según Le-Feaux, Galdames & Vázquez (2008), es de gran importancia debido a los costos asociados, siendo los más altos del negocio minero. Esto es porque se necesita una cantidad alta de equipos para llevar a cabo el proceso.

El carguío es el proceso de cargar, a un equipo de transporte, el material tronado en la frente de trabajo, por medio de un equipo dotado para realizar este tipo de trabajo. Mientras que el transporte consiste en trasladar el mineral previamente cargado, hacia diferentes destinos, los cuales han sido definidos previamente en el plan minero. Los destinos pueden ser botaderos, stock piles y planta (González, 2018).

Debido a los costos elevados de esta operación es necesario realizar un estudio para garantizar un trabajo óptimo, es por esto que la selección y cálculo de flota de equipos óptima está fuertemente ligada con la optimización del pit final. Una mejor selección de equipos puede influir de manera beneficiosa para la compañía minera en relación a los costos de mina y aumento de productividad (Bozorgebrahimi, Hall, & Blackwell, 2003).

## **Selección de Equipos**

De acuerdo con Moraga (2017) el procedimiento para la selección de equipos de carguío y transporte consiste en: determinar ritmo óptimo de explotación, determinar los recorridos del transporte, calcular tiempo de ciclo, calcular capacidad efectiva, iterar para mejorar la productividad, calcular el tamaño de la flota e iterar para reducir costos de capital y de operación.

## **Ritmo Óptimo de Explotación (ROE)**

Consiste en determinar la producción anual a explotar. Esto se determina con las fórmulas empíricas detalladas anteriormente (ver Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5). Para

posteriores cálculos y tener un resultado óptimo, se debe convertir la producción anual a toneladas por días y en algunos casos a toneladas por horas.

### **Recorrido del Transporte**

Se determina el trayecto total que debe realizar el equipo de transporte en cada ciclo. Se considera el recorrido tanto dentro de la mina como fuera de esta y la topografía involucrada, teniendo como resultado un recorrido diferente para cada tipo de material, ya que son diferentes las distancias de mina hacia botadero, *stock pile* y planta (Moraga, 2017).

### **Tiempo de Ciclo**

El tiempo de ciclo es la sumatoria de los tiempos empleados en cada tarea realizada por el equipo de transporte en conjunto con el equipo de carguío. El tiempo de carguío es dado por la suma de los tiempos de corte de material, giro o desplazamiento con carga, descarga del material y giro o desplazamiento sin carga, además de ser multiplicado por el número de paladas equivalentes a la capacidad del camión (Ecuación 8). Mientras que el tiempo de transporte del camión viene dado por la suma de los tiempos de viaje vacío, acuatamiento en unidad de carguío, carguío, viaje cargado, acuatamiento en unidad de descarga, descarga y demoras (Ecuación 9) (Ramírez, 2018).

$$TCC = Cm + Gcc + Dm + Gsc$$

$$TCT = Vv + Ac + (TCC \times N) + Vc + Ad + D + d$$

Donde:

$TCC$  = Tiempo de ciclo por equipo de carguío

$Cm$  = Tiempo para corte de material

$Gcc$  = Tiempo de giro o desplazamiento con carga

$Dm$  = Tiempo de descarga de material en equipo de transporte

$Gsc$  = Tiempo de giro o desplazamiento sin carga

$TCT$  = Tiempo de ciclo de transporte

$Vv$  = Tiempo de viaje vacío del transporte

$Ac$  = Tiempo de acuatamiento en unidad de carguío

- $N$  = Número de paladas necesarias para completar carga de equipo de transporte
- $Vc$  = Tiempo de viaje cargado del transporte
- $Ad$  = Tiempo de aculatamiento en unidad de descarga
- $D$  = Tiempo de descarga del equipo de transporte
- $d$  = Tiempo de espera en cualquier estación (programas y no programadas)

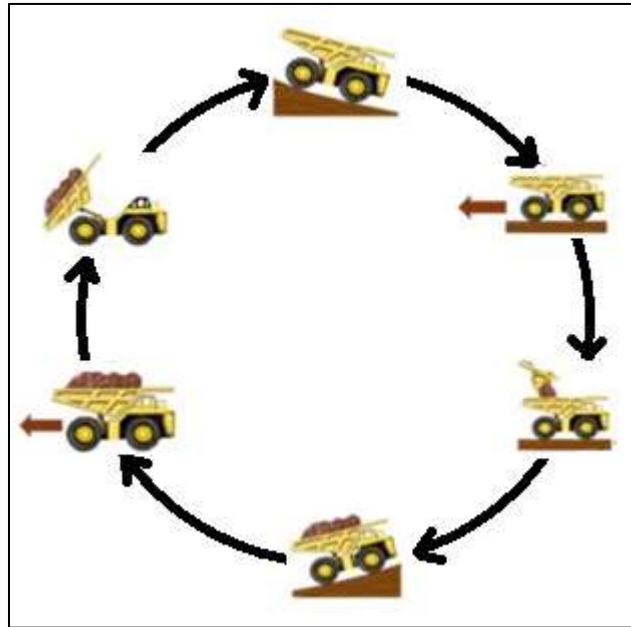


Ilustración 8: Tiempo de ciclo de transporte (Elaboración propia)

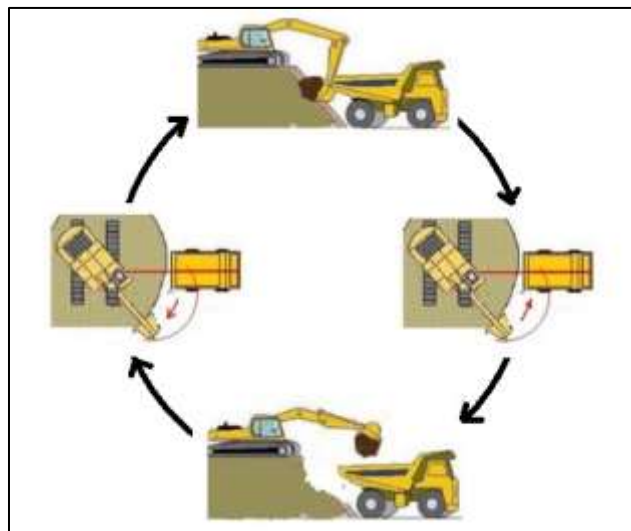


Ilustración 9: Tiempo de ciclo de carguío (Elaboración propia)

## Capacidad

Es sumamente importante determinar la capacidad efectiva que tiene el equipo, tanto de carguío como de transporte, para cuantificar la productividad que se tiene por periodos de tiempos determinados. La capacidad efectiva de los equipos dependerá del material, densidad, tamaño de colpas y esponjamiento, en el caso del equipo de carguío se añade otra componente, la cual es el factor de llenado. La productividad de un equipo se puede determinar mediante la siguiente fórmula (Ecuación 10):

$$Pr = Cap \times \frac{NC}{UT} \times Fe$$

Donde:

Pr = Productividad del equipo

Cap = Capacidad del equipo

NC = Número de ciclos

UT = Unidad de tiempo

Fe = Factores de eficiencia del equipo

## Flota de equipos

Para el dimensionamiento de la flota de equipos hay que tener en consideración que los equipos a evaluar deben además de cumplir con la producción establecida en el plan minero, también deben ser compatibles físicamente con la explotación, esto quiere decir que los equipos puedan desarrollar su trabajo en condiciones normales de operación y seguridad. Asimismo, debe existir compatibilidad física entre los equipos de carguío y transporte, esto es que el equipo de carguío pueda trabajar de manera conjunta con el transporte (Tapia, 2017).



## Dimensionamiento de Carguío

La capacidad del equipo carguío resulta de la siguiente fórmula (Ecuación 11):

$$Cc = \frac{Vb \times FLc \times \delta}{100 + \varepsilon}$$

Donde:

$Cc$  = Capacidad del equipo de carguío [ton]

$Vb$  = Volumen del balde del equipo de carguío [m<sup>3</sup>]

$FLc$  = Factor de llenado equipo de carguío [%]

$\delta$  = Densidad del material a cargar [ton/m<sup>3</sup>]

$\varepsilon$  = Esponjamiento del material [%]

La productividad horaria y diaria de un equipo de carguío resulta de Ecuación 12 y Ecuación 13 respectivamente:

$$PrHC = \frac{Cc \times DFc \times UTc \times FOc \times FM \times 10^{-8}}{TCc}$$

$$PrDC = PrHC \times HTc \times TDC$$

Donde:

$PrHC$  = Productividad horaria del equipo de carguío [ton/h]

$Cc$  = Capacidad del equipo de carguío [ton]

$DFc$  = Disponibilidad física del equipo de carguío [%]

$UTc$  = Factor de utilización del equipo de carguío [%]

$FOc$  = Factor operacional del equipo de carguío [%]

$FM$  = Factor del material [%]

$TCc$  = Tiempo de ciclo del carguío [h]

$PrDC$  = Productividad diaria del equipo de carguío [ton/día]

$HTc$  = Horas trabajadas por turno del carguío [h]

$TDC$  = Turnos trabajados por día para el carguío [turnos/día]

Finalmente se calcula el número de equipos de carguío necesarios para cumplir con la producción diaria (Ecuación 14):

$$NEc = \frac{T}{PrDC}$$

Donde:

$NEc$  = Número de equipos de carguío

$PrDC$  = Productividad diaria del equipo de carguío [ton/día]

$T$  = Tonelaje a mover [ton/día]

### Dimensionamiento de Transporte

La capacidad del equipo de transporte viene dada por su información técnica. Calcular la productividad del equipo se realiza de la siguiente forma (Ecuación 15):

$$PrDT = \frac{N \times Cc \times DFt \times UTt \times FOt \times 10^{-6}}{TCt}$$

Donde:

$PrDT$  = Productividad diaria del equipo de transporte [ton/día]

$TCt$  = Tiempo de ciclo de transporte [h]

$N$  = Número de paladas necesarias para completar carga de equipo de transporte

$Cc$  = Capacidad del equipo de carguío [ton]

$DFt$  = Disponibilidad física del equipo de transporte [%]

$UTt$  = Factor de utilización del equipo de transporte [%]

$FOt$  = Factor operacional del equipo de transporte [%]

Por lo tanto, para determinar la flota necesaria de equipo se desarrolla la siguiente fórmula (Ecuación 16):

$$NEt = \frac{T}{PrDT}$$

## **Dron**

Dron significa aeronave no tripulada, reutilizable o desechable, capaz de mantener un vuelo sostenido y dirigido mediante un control remoto o por un programa de entrada previa a su sistema (autónomo) (Lee & Choi, 2016). Estos son propulsados por un motor de explosión, eléctrico o de reacción (Sánchez, 2017).

De acuerdo con los autores Lee & Choi (2016) y Sánchez (2017) los drones se pueden encontrar en 2 grandes grupos: uso militar y uso civil.

A pesar de que los drones militares se llevan utilizando desde la primera guerra mundial, no se habían popularizados hasta la última década. Debido a los avances en tecnología tales como procesadores más rápidos y económicos, así como baterías con menor peso y mayor capacidad de energía, han llevado a que los drones sean más accesibles, con esto ha aumentado el uso civil (Sánchez, 2017).

### **Tipos de dron**

Los drones se pueden clasificar de diversas maneras, esto va a depender de su fisionomía, tipo de control o su uso (Sánchez, 2017).

De acuerdo a su fisionomía existen los siguientes grupos

#### **Multirrotores**

Son aquellos drones que se componen de varios motores independientes ubicados en los extremos de la aeronave. De acuerdo al número de motores se pueden clasificar como, tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octacópteros. Su uso es el más masivo, ya que tiene gran estabilidad, buena maniobrabilidad y puede quedar suspendido en el aire en un punto fijo. Las desventajas de este tipo de dron es su alto consumo energético, lo cual hace que tenga una baja autonomía de vuelo.



Ilustración 10: Dron Cuadricóptero Mavic 2 Pro (DJI, 2020)

### **Helicópteros**

La fisionomía de este tipo de dron es muy cercana a la de un helicóptero convencional, pero de un tamaño reducido. Lo compone un solo motor principal, esto ayuda a tener una mejor autonomía que los drones del tipo multirrotores. Estos drones tienen mayor complejidad mecánica, difícil maniobrabilidad y costo económico mayor que los multirrotores, lo cual conlleva a ser menos utilizados.



Ilustración 11: Dron Helicóptero VAPOR 55 (AeroVironment, 2020)

### **Ala fija**

Su fisionomía es semejante a la de un aeroplano, donde está compuesto por un cuerpo principal unido a un par de alas, las cuales permiten planear y un rotor en la parte posterior. Este rotor puede trabajar con energía eléctrica o por combustión. Es el dron con mayor

autonomía, sin embargo, una de sus desventajas es la gran área utilizada para despegar y aterrizar, aunque en ocasiones solo basta con lanzar el dron con un gran impulso para que este emprenda vuelo.



Ilustración 12: Dron Ala fija UX11 (Delair, 2020)

## **Aplicaciones de drones en minería**

De acuerdo con Sánchez (2017) los drones actualmente tienen varias herramientas que mejoran y facilitan las tareas a realizar en diferentes industrias. No es la excepción en el caso de la minería, ya que los drones se están utilizando en variados trabajos en este campo.

### **Prospección**

Los sensores multispectrales son herramientas que utilizan los satélites para capturar imágenes de la superficie del planeta, algunos expertos, es su mayoría geólogos, pueden interpretar las imágenes y establecer las litologías de superficies e identificar arcillas, óxidos y muchos tipos de minerales y suelos. Hoy en día se están incorporando a los drones, ya que estos tienen una calidad y detalle de imagen mejor que la del satélite.

### **Topografía**

Con técnicas de fotogramétricas se puede obtener un modelo 3D de gran precisión de la zona de estudio. Las imágenes que captura el dron forman parte de la técnica mencionada anteriormente. Gracias a esta técnica se pueden desarrollar actividades topográficas en minería de manera rápida y precisa. Como por ejemplo realizar la cubicación de acopios, conocer la hidrología y las zonas inundables, cálculo de pendientes, topografía inicial del terreno, entre otras.

### **Control de operaciones**

El dron permite obtener una imagen más amplia que la propia del jefe de operaciones de turno, es por esto que se ha incorporado el dron en esta área de trabajo para ayudar a tener una visión global y control mayor de la operación.

### **Monitoreo de estructuras**

El mantener la infraestructura en estado óptimo es fundamental para llevar a cabo la operación minera, por lo que el dron multirrotor es clave para detectar errores y fallas en las instalaciones en la faena.

### **Control medioambiental**

El medio ambiente es tema de estudio en minería desde el inicio a fin, por lo tanto, llevar un control de éste de manera eficiente es muy importante. Los drones hoy en día ayudan al monitoreo aéreo de la estabilidad geotécnica, drenaje de aguas, evolución de flora y fauna y otras actividades críticas medioambientales.

### **Servicios de emergencias y rescate**

Los drones fuertemente han ingresado a los servicios de emergencias, y aun siguen creando nuevas tecnologías para que presten un mejor servicio de rescate y primeros auxilios, es por esto que en zonas de difícil acceso se utilizan drones que son capaces de enviar materiales de primeros auxilios, un radio para comunicación con personal de rescate o una cuerda a la persona que está en una situación de emergencia.

## **Simulación**

De acuerdo con el economista y docente Thomas Herbert Naylor (1975) la palabra simulación se puede definir de la siguiente manera:

*Simulación es técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales*

*son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo.*(Como se cita en (Coos Bú, 1994))

Las etapas para realizar un estudio de simulación, de acuerdo con el autor (Coos Bú, 1994), son las siguientes:

**Definición del sistema:** en esta etapa se presenta el proceso a simular. Se debe señalar el foco de la simulación, es decir, que resultados son los que se van a analizar.

**Formulación del modelo:** una vez definidos los resultados esperados, se pasa a desarrollar el modelo. Aquí es donde se muestran las relaciones lógicas entre los procesos, esto se puede representar a través de un diagrama de flujo.

**Colección de datos:** en esta etapa se debe determinar la información necesaria del sistema a simular, tal como tiempo de cada proceso, distancias a recorrer, cuantas entidades pueden entrar a un proceso, cantidad de equipos, factores influyentes en una decisión, entre otros.

**Implementación del modelo en *software*:** una vez definido el modelo, el siguiente paso es llevar a cabo la simulación en un *software* que pueda entregar los resultados deseados.

**Validación:** esta etapa es una de las principales, ya que es necesario validar si los datos obtenidos representan la realidad del proceso simulado. Se puede realizar la validación comparando resultados del proceso real versus el de la simulación. Como por ejemplo, número de productos fabricados por hora, calidad del producto y costos.

**Experimentación:** se lleva a cabo la simulación. La experimentación genera los resultados deseados y realiza análisis de sensibilidad de los índices requeridos.

**Interpretación:** los resultados entregados de la simulación se interpretan y en base a esto se toma una decisión.

## Metodología

A continuación se expone, la metodología a utilizar en la presente memoria, el origen de los datos, así como los *softwares* utilizados y el procedimiento a realizar.

## Datos

En el presente trabajo se utiliza información diversa:

- Las características y capacidades de los drones se obtienen mediante una prueba comparativa (*benchmark*) de distintos sitios de la web de catálogos con información de drones.
- Los datos de equipos de carguío y transporte se extraen de los catálogos abiertos en la web.
- La información de costos de obras civiles se extrae a partir de información en la web de empresas de construcción civil.
- El modelo de bloques consta aproximadamente de 2.5 millones de bloques, con una dimensión de  $10 \times 10 \times 10 \text{m}^3$ . Este fue obtenido en un módulo impartido por la presente carrera. (Nota: Curso Minería a cielo abierto)

## Software

Uno de los *software* a utilizar en el presente trabajo de título es Vulcan, el cual puede soportar un modelo de bloques. Excel, este es necesario para los cálculos más básicos. Mientras que Arena será el encargado de llevar a cabo las simulaciones necesarias.

Los *software* mencionados tienen la siguiente definición general:

- **Vulcan** es un software minero tridimensional de gran capacidad tanto para diseño como planificación. Permite trabajar con datos geológicos de perforaciones, definir y modelar cuerpos mineralizados, analizar datos, aplicar geoestadística, estimar



recursos y realizar modelos de bloques. Tiene gran capacidad de modelado en tres dimensiones que le permiten desarrollar proyectos complejos en acotados tiempos y con gran precisión, ya sean para minería a cielo abierto como subterránea. Utiliza algoritmos que permiten optimizar el diseño del rajo y herramientas que facilitan el diseño de rampas y botaderos. (Maptek Pty Ltd, 2019)

- **Excel** es un programa informático desarrollado y distribuido por Microsoft Corp. Se trata de un *software* que permite realizar tareas contables y financieras gracias a sus funciones, desarrolladas específicamente para ayudar a crear y trabajar con hojas de cálculo.
- **Arena** es un programa de simulación de eventos discretos, se pueden representar diferentes modelos gracias a sus variadas herramientas. Todo modelo de simulación queda sujeto a la decisión del modelador, por ende el modelador tiene completo control sobre el evento a simular. (Rockwell Automation, 2020)

## Procedimiento

A partir de los datos, el procedimiento consiste en lo siguiente:

1. **Diseño.** Definir un pit final y diseñar el rajo en Vulcan. Esto permite operativizar la mina para los equipos seleccionados y que sea económicamente rentable como negocio.
2. **Destinos.** Cubicar el rajo mediante el software Vulcan y determinar el destino de cada bloque dependiendo de su ley estimada, es decir se define el tonelaje que se va a botadero, stock y planta.
3. **Plazo proyecto.** Se calcula el ritmo óptimo de explotación mediante la fórmula de Brian Mackenzie (1982). Con esto se puede determinar la vida de la mina.

$$ROE = 5,63 \times RM^{0,756}$$

- 4. Flota de transporte y carguío.** Calcular la flota de equipos de carguío y transporte necesaria para cumplir con el ritmo de producción obtenido, ajustando su capacidad de carga a la demanda de movimiento de mina.
- 5. Flota de drones.** Calcular flota de drones de manera análoga al equipo convencional, considerando los factores operacionales propios del dron y considerando el mismo diseño de rajo que para los equipos convencionales.
- 6. Diseño para dron.** Diseñar el rajo en el software Vulcan. Se realiza en base a las operaciones unitarias modificadas al utilizar dron como equipo de transporte de material. También mencionar cómo será el funcionamiento operativo en general de la mina con este nuevo medio de transporte.
- 7. Repetir procedimiento 2 y 5.** Realizar de la misma manera, solo que esta vez se considera el Diseño para dron. El resultado es la flota de drones requerida para el diseño nuevo.
- 8. Simular.** Se simulan las flotas obtenidas, en el punto 4 y 7.
- 9. Analizar resultados.** Los resultados de equipos convencionales versus drones, en función de la rentabilidad.
- 10. Concluir.**

# Resultados

## Caso de estudio

Antes de presentar los resultados, se describe el caso de estudio que forma parte de la investigación.

El presente caso de estudio corresponde a un yacimiento tipo pórfido cuprífero. Tiene forma tabular, donde las zonas mineralizadas se encuentran cercanas a superficie y se extienden hasta 900 metros de profundidad. El modelo de bloque está compuesto de aproximadamente 85 mil bloques con dimensiones de  $10 \times 10 \times 10 \text{ m}^3$ , con información de ley de cobre y litologías.

El método para extraer este yacimiento será cielo abierto, específicamente mediante el método de las cortas. A partir del modelo de bloques se desarrollan 2 casos, uno con equipos de carguío y transporte tradicional (Caso convencional) y otro con drones (Caso drones). Se evaluará económicamente cada caso, se compararán y se concluirá de acuerdo a los objetivos planteados anteriormente.

## Diseño para equipos convencionales

Con el modelo de bloques cargado y los parámetros de entrada (Tabla 1) se ejecuta la función *pit optimiser* del *software* Vulcan, obteniendo como resultado el *pit* final óptimo para el modelo de bloques cargado (ver ilustración 13). Cabe mencionar que el modelo de bloques solo contiene leyes de cobre (Cu), por ende su valorización se será en función a la ley del Cu y su extracción mineral será mediante el método de las cortas, mencionado anteriormente en el apartado de Marco teórico.

Tabla 1 Parámetros de entrada *pit optimiser* (elaboración propia)\*

Parámetros	Unidad	Valor
Precio Base Cu	[USD/lb]	2
Precio Mínimo Cu	[USD/lb]	1.8
Precio Máximo Cu	[USD/lb]	3.8
Recuperación metalúrgica	[%]	90
Dilución	[%]	10
Costo Venta	[USD/lb]	0.5
Costo Planta	[USD/ton]	10.3
Costo Mina	[USD/ton]	3
Precio de Venta Cu	[USD/lb]	2.8

\*Los valores presentados en la Tabla 1 son resultado de un *benchmark* realizado en la web abierta.

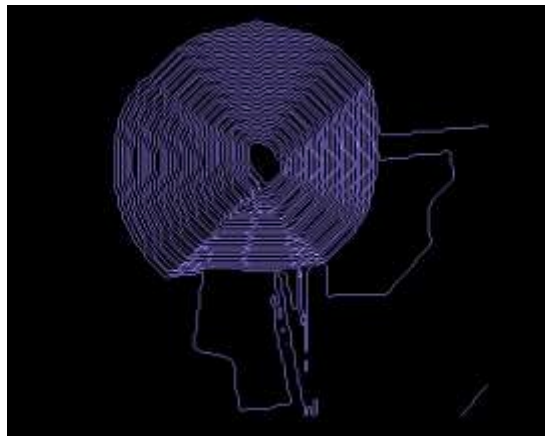


Ilustración 13: Vista en planta de *pit* óptimo (elaboración propia)

El *pit* final obtenido contempla los bloques a extraer para obtener un máximo beneficio, no obstante este no es operativo debido a que no desarrolla bancos, bermas, rampas, ni tampoco considera una área mínima de trabajo. En consecuencia, se procedió a diseñar un *pit* que respete los límites físicos del *pit* final y que además considere los aspectos operacionales del rajo. Los criterios usados para diseñar el rajo son presentados en la Tabla 2 y como resultados su diseño se puede observar en la Ilustración 14, resultando un *pit* de 380 metros de profundidad con 38 bancos. Este diseño fue realizado mediante las herramientas del *software* Vulcan.

Tabla 2 Características de diseño del rajo (*elaboración propia*)

Característica	Valor
Angulo talud	65°
Altura de banco	10 m
Ancho de berma	2.9 m
Ancho de rampa	31.5 m
Angulo de rampa	10°

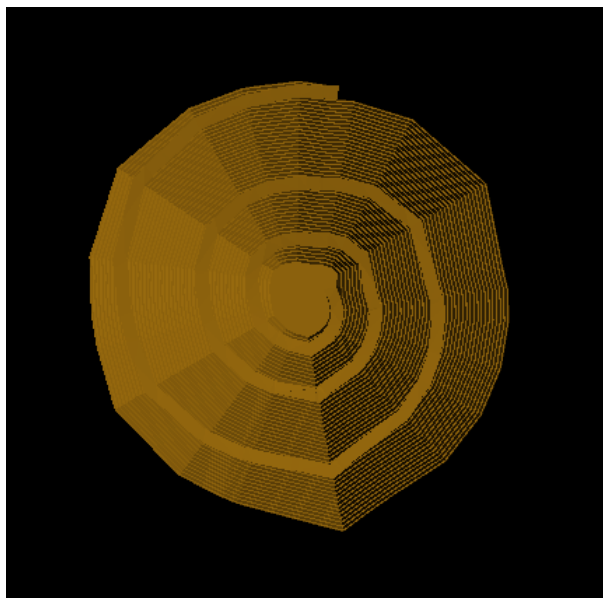


Ilustración 14: Diseño operativo del *pit* final (*elaboración propia*)

## Destinos

Para definir destinos previamente se debe cubicar el rajo, obteniendo la totalidad de material a mover, posterior a esto se calcula ley de corte crítica y marginal, las cuales ayudaran a categorizar el material a remover.

La ley de corte crítica (LCC) y la ley de corte marginal (LCM) vienen definidas por las ecuaciones 6 y 7 respectivamente, mencionadas anteriormente en Marco teórico. Las variables que se utilizaron para el desarrollo de la ecuación son costo mina, costo planta,

costo de venta, precio venta Cu y recuperación metalúrgica (RM) (ver Tabla 1), dando el siguiente resultado:

$$LCC = \frac{(Costo\ mina + Costo\ Planta) \times 100}{(Precio\ venta\ Cu - Costo\ venta) \times RM \times 2204.62}$$

$$LCC=0.29\%$$

$$LCM = \frac{Costo\ Planta \times 100\%}{(Precio\ venta\ Cu - Costo\ venta) \times RM \times 2204.62}$$

$$LCM = 0.23\%$$

Una vez calculadas las leyes de corte, se puede categorizar el material como estéril, mineral o stock. En la Tabla 3 se puede ver el tonelaje total que contempla el rajo, además se muestra la categorización del material y su ley promedio respectivamente.

*Tabla 3* Categorización del material mover en pit (*elaboración propia*)

<b>Categoría</b>	<b>Tonelaje [Mt]</b>	<b>Ley promedio</b>
Mineral	84.3	0.57%
Stock	3.3	0.27%
Estéril	156.3	0.07%
Total	243.9	n/a

De la tabla anterior se determina la relación estéril mineral (REM), siendo esta igual a **1.85**.

Una vez categorizado el mineral, se define el destino correspondiente al mineral, stock y estéril, siendo estos planta, *stock pile* y botadero respectivamente.

### **Plazo de proyecto**

Determinar el ritmo óptimo de producción es de suma importancia, debido a que está directamente relacionado con la inversión necesaria para llevar a cabo un proyecto minero. Para el cálculo se utilizará la fórmula empírica de Brian Mackenzie (1982) (Ecuación 4). Donde la única variable a utilizar es la totalidad de mineral a extraer. Como resultado se tiene lo siguiente:

$$ROE = 5.63 \times RM^{0,756}$$

$$ROE = 5.5 \text{ Mt mineral/año}$$

El resultado anterior muestra la cantidad de mineral a remover por año, a partir de esto se puede definir los años de vida de la mina, obteniendo como resultado aproximado 15 años. Por consiguiente es necesario saber la totalidad de material a mover por año, es decir se incluye mineral, *stock* y estéril, obteniendo como resultado 16.3 Mt por año. Si lo transformamos a producción por hora se tiene que remover 1,882 t/h.

## Flota de transporte y carguío para *pit* óptimo

Para el desarrollo del cálculo de flota de transporte y carguío primeramente se eligen los equipos a utilizar, en el caso de la presente memoria los equipos son el camión minero Caterpillar 789D y la pala hidráulica 6030FS de la misma marca. Algunas de las características importantes de estos equipos se encuentran en la Tabla 4 y Tabla 5.

Cabe señalar que los equipos son completamente compatibles en operación de acuerdo al catálogo de Caterpillar.

Luego de definir los equipos se calcula el rendimiento efectivo de cada equipos, para esto es necesario definir previamente las distancias de desplazamiento de los camiones y tiempos de ciclos de ambos equipos.

*Tabla 4* Características de Camión minero CAT 789D (*Caterpillar Inc, 785D Camión minero, 2010*)

Capacidad de carga	181 t
Ancho total	6.9 m
Altura de carga	5.6 m
Velocidad máxima	50 km/h
Tiempo de elevación de caja	19 s
Tiempo de bajada de caja	17 s

*Tabla 5 Características de pala hidráulica CAT 6030Fs (Caterpillar Inc, 2016)*

Capacidad de pala	21.6 yd <sup>3</sup>
Ancho de equipo	7.4 m
Altura máxima de descarga	10.7 m
Velocidad desplazamiento máxima	2.7 km/h

## **Desplazamiento**

Las distancias que recorrerá el camión vendrán dadas por el tipo de material que transporta. En la Tabla 6 se presentan las distancias, velocidades y destinos que deben recorrer los equipos de transporte.

*Tabla 6 Distancias y velocidades según destino (elaboración propia)*

<b>Destino</b>	<b>Distancia [km]</b>	<b>Velocidad vacío [km/h]</b>	<b>Velocidad cargado [km/h]</b>
<b>Planta</b>	1.5	30	25
<b>Stock pile</b>	1	30	25
<b>Botadero</b>	3	30	25
<b>Rampa</b>	0 a 3.7	18	16
<b>Rajo</b>	0.12 a 0.85	20	18

Es importante mencionar que la distancia en Rampa (Tabla 6) va de 0 km a 3.7 km debido a que se considera que en primera instancia el equipo de transporte estará trabajando en superficie, por ende su desplazamiento en rampa es de 0 km, mientras que al final del proyecto minero se encontraran trabajando a -370 m respecto a la superficie, considerando el 10% de pendiente que tiene la rampa serán 3.7 km de trayecto. En cuanto a la distancia en Rajo (Tabla 6) se considera la distancia horizontal máxima por banco, es decir en un inicio esta distancia corresponde a 850 m mientras que en el último banco es de 123 m.

Considerando los valores entregados en la Tabla 6, se realiza un promedio ponderado de las distancias según su destino y banco, obteniendo 4.2 km de distancia promedio a recorrer el



equipo de transporte. El cálculo mencionado anteriormente se desarrolla de la siguiente manera:

A modo de ejemplificar solo se tomará un banco, en este caso será el banco número 7. Este banco presenta las mismas distancias en superficie(ver Tabla 6, Planta, *Stock pile* y Botadero), mientras que la distancia en rampa es de 600 m y el desplazamiento en la horizontal es de 745 m. Además se tiene que el banco representa el 4.95% de la totalidad de material a mover, y de estos el 74.1% corresponde a estéril, el 24.1% a mineral y el 1.8% a *stock pile*. Con lo dicho anteriormente se desarrolla el siguiente cálculo para determinar la distancias ponderada (DP) del Banco 7.

$$DP = [600 + 745 + (1500 \times 24.1\%) + (1000 \times 1.8\%) + (3000 \times 74.1\%)] \times 4.95\%$$

$$DP = 195 \text{ m}$$

De esta manera se obtiene el desplazamiento ponderado de cada banco, se suman y resulta un desplazamiento promedio de 4,225 m. (ver Apéndice 1)

### **Tiempo de ciclo**

Primeramente se calcula el tiempo de ciclo del equipo de carguío mediante la Ecuación 8 presentada en el apartado de Marco teórico. El resultado se presenta en la Tabla 7.

Además del tiempo de ciclo es importante el balde efectivo del equipo de carguío, para esto se utilizan variables tales como dimensión del balde, los factores operacionales asociados a la pala hidráulica, densidad y esponjamiento del mineral. Los valores de las variables mencionadas anteriormente se visualizan en la Tabla 8, además se puede encontrar el resultado de balde efectivo.

*Tabla 7* Tiempo de ciclo de pala hidráulica CAT 6030FS (*elaboración propia*)

<b>Actividad</b>	<b>Tiempo[s]</b>
Corte	10
Giro cargado	10
Descarga	5
Giro vacío	10
<b>Ciclo total</b>	<b>35</b>

Tabla 8 Variables que determinan balde efectivo de CAT 6030FS (*elaboración propia*)

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Balde	21.6 yd <sup>3</sup>
Densidad material	2.7 t/m <sup>3</sup>
Esponjamiento	30%
Factor de llenado	90%
Índice utilización	90%
Factor operacional	85%
Disponibilidad física	85%
<b>Balde Efectivo</b>	<b>20.1 t</b>

Con estos datos se puede determinar la productividad de la pala:

$$Productividad = \frac{Carga\ efectiva}{Tiempo\ de\ ciclo}$$

$$Productividad = 2,065\ t/h$$

Una vez calculado el tiempo de ciclo y balde efectivo de la pala se procede a calcular el tiempo de ciclo total de las operaciones unitarias carguío y transporte.

En la Tabla 9 se puede visualizar los factores que influyen en la tolva efectiva del camión, mientras que en la Tabla 10 se muestra el resultado del tiempo de ciclo total, de acuerdo a la Ecuación 9 presentada en Marco teórico.

Tabla 9 Variables que determinan tolva efectiva de CAT 789D (*elaboración propia*)

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Tolva	181 t
Factor de Llenado	95%
Índice Utilización	85%
Factor Operacional	85%
Disponibilidad Física	85%
<b>Tolva efectiva</b>	<b>105.6</b>

Del resultado anterior se obtiene que el número de la paladas reales para completar la carga del camión es de 6 paladas.

Tabla 10 Tiempo de ciclo de camión CAT 789D (elaboración propia)

Tiempo por palada	35 s
N° paladas	6
Tiempo cargado (ida)	0.20 h
Acuatamiento y espera	54 s
Tiempo de descarga	36 s
Tiempo vacío (vuelta)	0.18 h
<b>Tiempo de ciclo total</b>	<b>0.46 h</b>

Con lo anterior se puede establecer que la productividad por hora del camión minero corresponde a:

$$Productividad = 227.5 \text{ t/h}$$

### Flota de equipos

Finalmente se puede determinar la flota de equipos tanto de carguío como transporte con el siguiente cálculo:

$$Flota = \frac{Producción \text{ por hora}}{Productividad \text{ de equipo por hora}}$$

$$Flota \text{ de Carguío} = \frac{1,882 \text{ t/h}}{2,065 \text{ t/h}} = 0.9$$

Como no se pueden tener 0.9 pala se aproxima al número entero mayor más próximo. Es decir la flota de equipo de carguío es 1 equipo.

$$Flota \text{ de Transporte} = \frac{1,882 \text{ t/h}}{227.47 \text{ t/h}} = 8.3$$

De manera análoga al cálculo de la flota de carguío, este resultado se debe aproximar al número entero mayor, por ende se tiene una flota igual a 9 camiones.

## Operaciones unitarias con drones

La operación con drones es de la siguiente manera:

Un conjunto determinado de drones serán los encargados de trasladar los equipos desde la superficie a la frente de trabajo en el interior del rajo. Los equipos ingresan a una plataforma, los drones en su base tienen unida una cadena de carga, en el otro extremo de la cadena tienen un gancho de izaje automático, estos toman la plataforma con el equipo en su interior y lo dejan en su destino.

Una vez realizada la perforación y la preparación de barrenos para la posterior tronadura, los drones nuevamente se encargan de evacuar los equipos a las zonas de seguridad para dar paso a la voladura como tal. Todo el proceso, tanto de perforación como tronadura serán realizados de manera remota, es decir no habrá personal al interior del rajo (nota: los drones, en caso de ser sumamente necesario, también son capaces de trasladar personal).

Con el material fragmentado viene el proceso de carguío y transporte (nota: la granulometría para este tipo de operación no debe ser superior a 0.5 m de diámetro, en caso de sobre tamaño, existirá un minicargador con martillo hidráulico). Estas operaciones se realizarán mediante minicargadores y drones respectivamente. El funcionamiento de estos equipos consiste en:

- El dron inicia vuelo desde el lugar de estacionamiento hacia el rajo, trasladando un contenedor de material vacío. El transporte del contenedor es mediante una cadena y un gancho automático, es decir el dron llevará el contenedor de manera suspendida.
- Al llegar al rajo posiciona el contenedor vacío en el lugar asignado para su posterior carga.
- El dron recoge un contenedor cargado previamente y lo traslada a su destino correspondiente.
- El minicargador alimenta el contenedor dejado por el dron para ser retirado por el siguiente equipo. El minicargador será operado de manera remota.
- En el lugar de destino el dron descarga el contenedor, recoge un nuevo contenedor vacío y se dirige nuevamente al rajo, repitiendo el ciclo.

- Los contenedores son vaciados gracias al mecanismo utilizado por los recolectores de carga (ver Ilustración 15). Estos alza contenedores descargan el material a un buzón de alimentación en planta, mientras que en botadero y *stock pile* lo descargan en un sector determinado para su posterior distribución mediante un equipo auxiliar.

Teniendo en cuenta que el dron puede presentar alguna falla, existirá un taller de mantenimiento de drones en la superficie del rajo y otro se encontrará más cercano a planta, donde además en este se encuentra el abastecimiento de combustible de los equipos. En caso de que el dron indique una anomalía en su funcionamiento, este se dirigirá inmediatamente al taller de mantenimiento más cercano y dejará el contenedor (vacío o cargado) en un lugar determinado. Los minicargadores por su parte serán movilizados con la ayuda de los drones a superficie para su mantenimiento y carga de combustible cuando sea necesaria.

Otro punto importante para señalar es que los drones tienen rutas definidas de vuelo, donde no se pueden acercar a menos de 25 m un dron de otro por temas de seguridad. Todo esto es programable en su sistema operativo y por ende su funcionamiento será completamente autónomo. Cabe señalar que la visión del dron es infrarroja y que cada dron interactúa con otro a cierta distancia para traspaso de información, esto indica que no se necesita iluminación para los equipos aéreos durante la noche. No obstante existirá una sala de control donde se supervisará su operación en tiempo real y de manera continua.



Ilustración 15: Alza contenedor multinorma OCTB-1124 (*Mecalux logismarket, 2020*)

## Diseño para operación con dron

A partir del mismo *pit* óptimo obtenido anteriormente (ver Ilustración 13) se diseña un rajo con las mismas particularidades de la Tabla 2, pero en este caso no se consideran las características de la rampa (ancho y ángulo) debido a que este diseño no las contempla. El resultado del diseño se puede ver en la Ilustración 16. Cabe señalar que este diseño tiene la misma cantidad de bancos que el realizado anteriormente, por ende consta de 38 bancos de 10 metros de altura. En la Ilustración 17 se puede visualizar la vista transversal del rajo con y sin rampas, además se puede ver el resultado del *pit* óptimo entregado por el *software Vulcan*.

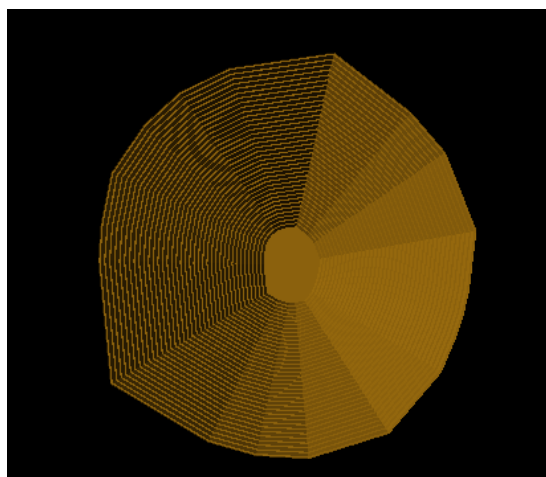


Ilustración 16 Diseño operativo del pit para dron, vista en planta (*elaboración propia*)

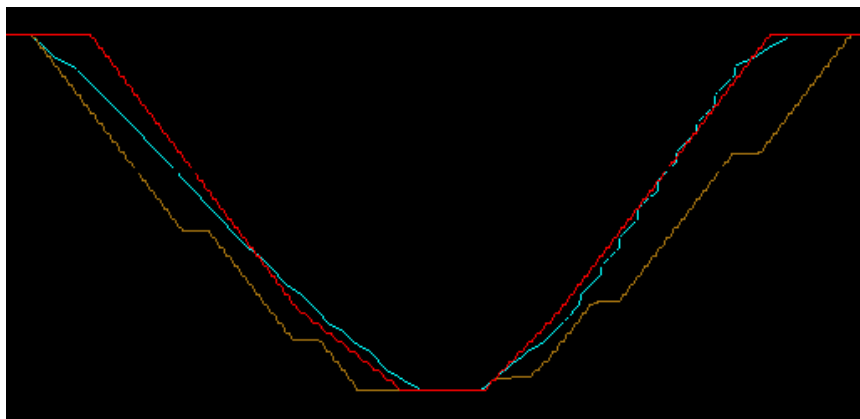


Ilustración 17 Vista transversal del rajo con y sin rampas (*elaboración propia*)\*

\*El color rojo, café y celeste en la Ilustración 17 representan diseño sin rampa, con rampas y *pit* óptimo respectivamente.

## Destinos

La totalidad de material a mover y los destinos que tomará cada bloque viene dado en función de la ley de corte crítica y marginal del rajo. Cabe señalar que en este caso los costos de mina serán diferentes al obtenido anteriormente, debido a que hay servicios auxiliares asociados a la rampa que no son necesarios, además existen diferencia en consumo de combustible y costos de mantenimiento de los equipos. Lo indicado anteriormente se verá reflejado en el apartado de Análisis de los resultados, debido que ahora no se pueden determinar esos costos ya que son en función la flota de equipos.

$$LCC=0.29\%$$

$$LCM = 0.23\%$$

En la Tabla 11 se muestra la totalidad de material a mover según su categoría.

*Tabla 11* Categorización del material mover en *pit* para dron (*elaboración propia*)

<b>Categoría</b>	<b>Tonelaje [Mt]</b>	<b>Ley promedio</b>
Mineral	73.9	0.58%
Stock	3.1	0.27%
Estéril	74.1	0.06%
Total	151.2	n/a

De la tabla anterior se determina la relación estéril mineral (REM), siendo esta igual a **1**.

## Plazo de proyecto

Para el cálculo se utilizará la fórmula empírica de Brian Mackenzie (1982) (Ecuación 4). La única variable por utilizar es la totalidad de mineral a extraer. Como resultado se tiene lo siguiente:

$$ROE = 5.63 \times RM^{0.756}$$

$$ROE = 5.0 \text{ Mt mineral/año}$$

El resultado anterior muestra la cantidad de mineral a remover por año, a partir de esto se puede definir los años de vida de la mina, obteniendo como resultado aproximado 15 años.

La totalidad de material a mover es de 10 Mt por año. Si lo transformamos a producción por hora se tiene que remover 1,167 t/h.

## Flota de drones

A continuación se muestran los resultados que dimensionan la flota necesaria para transportar el material del *pit* con rampas y del diseño para la operación con dron.

El dron que se utiliza en la presente memoria como equipo de transporte es de la empresa e.Yo Copter modelo *one tone* (Ilustración 18), mientras que el equipo de carguío será el minicargador Bobcat S650. En la Tabla 12 y Tabla 13 se muestran las características más importantes de los equipos mencionados anteriormente.

Tabla 12 Características de dron e.Yo Copter *one tone* (e.Yo Copter, 2018)

Capacidad de carga	860 kg
Velocidad Máxima	150 km/h
Dimensiones del equipo	6 m
Consumo de combustible	244 l/h



Ilustración 18: Dron e.Yo Copter modelo *One Tone* (e.Yo Copter, 2018)



Tabla 13 Características de minicargador Bobcat S650 (Bobcat, 2012)

Capacidad de carga	1.282 t
Ancho de equipo	1.8 m
Altura máxima de descarga	2.4 m
Velocidad desplazamiento máxima	19.8 km/h

## Desplazamiento

Las distancias que recorre el dron y las velocidades promedio según su destino y diseño de rajo se presentan en la Tabla 14 y 15.

Tabla 14 Distancias y velocidades para rajo convencional (*elaboración propia*)

Destino	Distancia [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad cargado [km/h]
<b>Planta</b>	1.5	60	50
<b>Stock pile</b>	1	60	50
<b>Botadero</b>	3	60	50
<b>Rajo</b>	0.425 a 0.574	40	35

Tabla 15 Distancias y velocidades para rajo sin rampas (*elaboración propia*)

Destino	Distancia [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad cargado [km/h]
<b>Planta</b>	1.5	60	50
<b>Stock pile</b>	1	60	50
<b>Botadero</b>	3	60	50
<b>Rajo</b>	0.390 a 0.548	40	35

La Tabla 14 y 15 de manera general son iguales, solo existe diferencia en el desplazamiento dentro del rajo. Esta distancia resulta del cálculo de la diagonal que existe por banco. (ver Apéndice 2 para rajo con rampas y Apéndice 3 sin rampas)

De la misma manera que el desplazamiento del camión minero, se desarrolla el desplazamiento promedio pondera que recorrerá el dron. De esta manera se tiene que para el rajo convencional el trayecto es de 2,905 m y en el diseño para dron es de 2,643 m. (Apéndice 2 y Apéndice 3)

## Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo para el minicargador Bobcat S650 se calcula mediante la Ecuación 8 presentado en el apartado de Marco teórico, el resultado se puede visualizar en la Tabla 16.

Tabla 16 Tiempo de ciclo de minicargador Bobcat S650 (*elaboración propia*)

<b>Actividad</b>	<b>Tiempo[s]</b>
Corte	7
Traslado cargado	12
Descarga	4
Traslado vacío	12
<b>Ciclo total</b>	<b>35</b>

El balde efectivo del equipo de carguío se presenta en la Tabla 17, donde influyen tanto la capacidad de carga del equipo como sus factores operacionales.

Tabla 17 Variables que determinan balde efectivo de Bobcat S650 (*elaboración propia*)

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Capacidad de carga	1.282 t
Factor de Llenado	90%
Índice Utilización	90%
Factor Operacional	85%
Disponibilidad Física	85%
<b>Balde efectivo</b>	<b>0.75 t</b>

Con el tiempo de ciclo y balde efectivo del minicargador calculado, se pasa a determinar la carga efectiva del dron y posteriormente se tendrá el tiempo de ciclo total entre las operación de carguío y transporte.

La Tabla 18 muestra la capacidad de carga efectiva que tendrá el dron, considerando variables como factores operacionales, carga de contenedor y capacidad de carga del equipo.

*Tabla 18 Variables que determinan carga efectiva de dron (elaboración propia)*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Capacidad de carga	0.86 t
Carga de contenedor	0.1 t
Factor de Llenado	100%
Índice Utilización	95%
Factor Operacional	95%
Disponibilidad Física	95%
<b>Carga efectiva</b>	<b>0.65 t</b>

A partir del resultado de balde efectivo del minicargador y la capacidad de carga del dron se tiene que se necesita solo 1 palada para cumplir con la capacidad máxima del equipo transporte.

Los tiempos que influyen en el ciclo total del dron son presentados en Tabla 19, donde además se hace una diferencia entre el diseño con y sin rampas, ya que los desplazamientos no son iguales.

*Tabla 19 Tiempo de ciclo dron en rajo con/sin rampa (elaboración propia)*

<b>Tiempo</b>	<b>Rajo con rampas</b>	<b>Rajo sin rampas</b>
Descarga de contenedor vacío	10 s	10 s
Carga de contenedor lleno	10 s	10 s
Vuelo cargado (ida)	0.062 h	0.057 h
Descarga de contenedor lleno	10 s	10 s
Carga de contenedor vacío	10 s	10 s
Vuelo vacío (vuelta)	0.052 h	0.048 h
Espera	15 s	15 s
<b>Tiempo ciclo total</b>	<b>0.13 h</b>	<b>0.12 h</b>

## **Flota de equipos**

A partir de los resultados obtenidos, las capacidades efectivas y el tiempo de ciclo, se determina la productividad por equipo.

$$Productividad = \frac{Carga\ efectiva}{Tiempo\ de\ ciclo}$$

Por último la flota de equipos para cada tipo de diseño se presenta en la Tabla 20 y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Flota = \frac{Producción\ por\ hora}{Productividad\ de\ equipo\ por\ hora}$$

Tabla 20 Resultado de flota de equipos para rajo con y sin rampa (*elaboración propia*)

Variable	Rajo con rampas		Rajo sin rampas	
	Dron	Minicargador	Dron	Minicargador
<b>Carga Efectiva</b>	0.65 t	0.75 t	0.65 t	0.75 t
<b>Tiempo de ciclo</b>	0.13 h	35 h	0.12 h	35 h
<b>Productividad</b>	5 t/h	77.2 t/h	5.5 t/h	77.2 t/h
<b>Producción requerida</b>	1882 t/h	1882 t/h	1167 t/h	1167 t/h
<b>Flota</b>	<b>374</b>	<b>25</b>	<b>214</b>	<b>16</b>

Es importante determinar la cantidad de alza contenedores necesarios para cumplir la producción definida. Estos tienen un tiempo de ciclo de 10 a 15 segundos, es decir, puede realizar 240 ciclos por hora en el peor de los casos. Considerando que un dron realiza 8 entregas por hora, y teniendo una flota de 214 drones, la totalidad de entregas será de 1721 por hora. Dicho lo anterior, la totalidad de entregas es dividida por la cantidad de ciclos del alza contenedores, dando como resultado 7 alza contenedores para la flota de 214 drones.

## Simulación

A partir de los resultados de flota, se realiza una simulación para los escenarios del diseño con rampas (camión) y del diseño sin rampa (dron) del pit óptimo. No es relevante la

simulación de flota de drones para el diseño con rampas, debido a que operacionalmente no tiene sentido.

La simulación tiene la finalidad de determinar el porcentaje de utilización de los equipos, y a partir de este, calcular la flota de equipos real. En la Ilustración 19 se presenta el diagrama de flujo como modelo inicial que representa el proceso que llevara a cabo tanto el dron como el camión.

Se simula un mes del proceso productivo continuo, donde se deja de lado el tiempo que emplea un cambio de turno. Además, para una mayor representatividad se harán 5 repeticiones de cada simulación (camión y dron) para obtener resultados que representen de mejor manera el modelo matemático de fondo.

En Apéndice 4 y Apéndice 5 se presentan los datos requeridos de cada proceso, ruta, decisión, entre otros, para llevar a cabo la simulación de la flota de camiones y de drones respectivamente.

Cabe mencionar que los datos utilizados fueron obtenidos en un estudio de mercado, en las rutas se utilizaron valores constantes, de acuerdo a la velocidad y la distancia recorrida. En los mantenimientos correctivos se utilizan distribuciones de tiempo uniforme, sin necesidad de utilizar algún recurso, mientras que en los procesos de carguío, descarga, abastecimiento de combustible y mantenimiento preventivo depende de un recurso, por ende se pueden generar tiempos de espera (cola) para ser atendidos por el recurso. Los recursos por proceso se pueden ver en la Tabla 21.

El modelo final de simulación hecho en arena se puede visualizar en Apéndice 6 para camión y Apéndice 7 para dron.

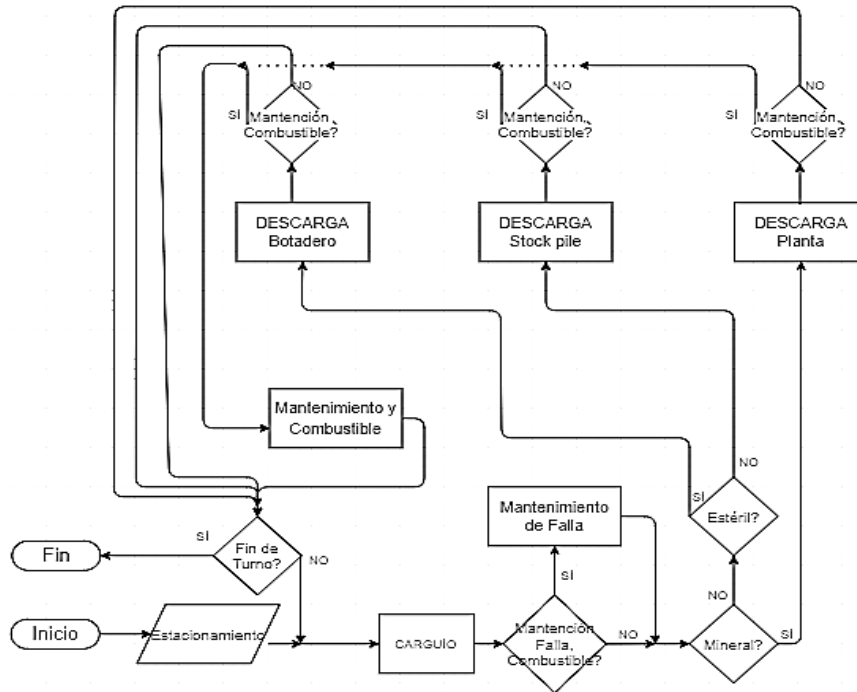


Ilustración 19: Modelo para simulación de equipos (*elaboración propia*)

Tabla 21 Recursos utilizados por proceso y equipo (*elaboración propia*)

Proceso	Camión		Dron	
	Recurso	Nº de recursos	Recurso	Nº de recursos
<b>Carguío</b>	Pala hidráulica	1	Minicargador	16
<b>Descarga Botadero</b>	Punto vaciado	1	Alza contenedor	3
<b>Descarga Stock pile</b>	Punto vaciado	1	Alza contenedor	1
<b>Descarga Planta</b>	Punto vaciado	1	Alza contenedor	3
<b>Carga Combustible</b>	Dispensador	1	Dispensador	20
<b>Mant. Preventivo</b>	Mecánico	1	Mecánico	10

Después de correr las 5 simulaciones para cada equipo, se pueden observar los tiempos en que los equipos están a espera de entrar a un proceso y además se aprecian los tiempos en que los equipos no están produciendo, como por ejemplo, tiempos en taller, en carga de combustible, entre otras.

Los tiempos de cola promedio por equipo, asociados a los procesos mostrados en la Tabla 21, se presentan en la Tabla 22, mientras que los tiempos no productivos se enseñan en la Tabla 23.

*Tabla 22* Tiempo en cola por equipo y proceso (*elaboración propia*)

Proceso	Tiempo en cola [h]	
	Camión	Dron
<b>Carguío</b>	0.026	0.000
<b>Descarga Botadero</b>	0.000	0.002
<b>Descarga Stock pile</b>	0.000	0.000
<b>Descarga Planta</b>	0.000	0.002
<b>Carga Combustible</b>	0.355	0.102
<b>Mant. Preventivo</b>	1.155	0.000
<b>Total</b>	<b>1.54</b>	<b>0.11</b>

*Tabla 23* Tiempo no productivo por equipo y proceso (*elaboración propia*)

Proceso	Tiempo no productivo [h]	
	Camión	Dron
<b>Falla Grave</b>	-	7.77
<b>Falla Media</b>	6.71*	2.52
<b>Falla Leve</b>	-	0.62
<b>Ruta Botadero-Taller</b>	0.03	0.02
<b>Ruta Stock Pile-Taller</b>	0.03	0.02
<b>Ruta Planta-Taller</b>	0.02	0.01
<b>Carga combustible</b>	0.83	0.13
<b>Mant. Preventivo</b>	19.04	9.99
<b>Ruta vuelta Taller-Rajo</b>	0.07	0.03
<b>Ruta vuelta Botadero-Rajo</b>	-0.10**	-0.05**
<b>Ruta vuelta Stock Pile-Rajo</b>	-0.03**	-0.03**
<b>Ruta vuelta Planta-Rajo</b>	-0.05**	-0.03**
<b>Total</b>	<b>26.55</b>	<b>21.00</b>

\* El valor corresponde al tiempo de Mantenimiento correctivo del camión, ya que en la simulación no se hace diferencia en la gravedad de la falla.

\*\* El valor es negativo debido a que al tomar las rutas hacia el taller, y luego la ruta de taller al rajo, se ahorra el desplazamiento directo del destino al rajo.

Los resultados presentados en Tabla 22 y Tabla 23 representan el tiempo promedio por equipo que pasó por el procesos. La cantidad de veces que pasó un equipo por el procesos se muestra a continuación, en la Tabla 24.

Tabla 24 Equipos que pasaron por procesos no productivos y colas (*elaboración propia*)

	Proceso	Número de equipos	
		Camión	Dron
Proceso no productivo	Falla Grave	0	111
	Falla Media	249	311
	Falla Leve	0	1,084
	Botadero-Taller	445	56,326
	Stock Pile-Taller	4	2,379
	Planta-Taller	249	56,138
	Carga combustible	445	114,757
	Mant. Preventivo	4	220
	Vuelta Taller-Rajo	694	114,799
	Vuelta Botadero-rajo	445	56,326
	Vuelta SP-Rajo	4	2,379
	Vuelta Planta-Rajo	249	56,138
Colas en proceso	Carguío	8,899	952,758
	Descarga Botadero	5,704	466,700
	Descarga Stock pile	87	19,046
	Descarga Planta	3,104	466,904
	Carga Combustible	445	104,771
	Mant. Preventivo	4	948

Una vez obtenidos los resultados anteriores se puede determinar el tiempo total perdido de la utilización de los equipos. Este se obtiene a través de la multiplicación del tiempo no productivo por la cantidad de equipos que pasaron por el proceso. En la Tabla 25 se puede observar el tiempo perdido total.

En la Tabla 26, se puede apreciar el resultado del porcentaje de utilización para cada equipo. Se observa que la utilización de los drones es mayor respecto a la de los camiones, teniendo un 18% más de utilización.



Tabla 25 Tiempo acumulado sin utilizar productivamente los equipos (*elaboración propia*)

	Proceso	Tiempo perdido Acumulado [h]	
		Camión	Dron
Proceso no productivo	Falla Grave	0	863
	Falla Media	1671	783
	Falla Leve	0	676
	Botadero-Taller	15	939
	Stock Pile-Taller	0	40
	Planta-Taller	4	468
	Carga combustible	371	14348
	Mant. Preventivo	76	2198
	Vuelta Taller-Rajo	46	3827
	Vuelta Botadero-rajo	-45	-2816
	Vuelta SP-Rajo	0	-79
	Vuelta Planta-Rajo	-12	-1403
Proceso con colas	Carguío	231	45
	Descarga Botadero	0	755
	Descarga Stock pile	0	4
	Descarga Planta	0	772
	Carga Combustible	158	10697
	Mant. Preventivo	5	0
	<b>Tiempo total</b>	<b>2520</b>	<b>32115</b>

Tabla 26 Porcentaje de utilización por equipo (*elaboración propia*)

	Camión	Dron
N° equipos	9	214
Tiempo por equipo	720	720
Tiempo por utilizar	6480	154080
Tiempo perdido	2520	32115
% Utilización	<b>61%</b>	<b>79%</b>

Como se determinó en la Tabla 20, la flota de equipos de transporte para el diseño con rampa y sin rampa es de 9 y 214 respectivamente. Ahora bien, como se obtuvo una utilización experimental en la Tabla 26, se obtiene una nueva flota que cumple con la producción requerida.

Tabla 27 Flota real después de simulación de acuerdo a la utilización experimental  
(*elaboración propia*)

	<b>Camión</b>	<b>Dron</b>
<b>Flota</b>	9	214
<b>Utilización</b>	61%	79%
<b>Flota real</b>	<b>15</b>	<b>271</b>

## Evaluación económica

En este apartado se determinan los aspectos económicos de ambos proyectos, donde se calculan las inversiones de equipos, ingresos por venta del producto, egresos por costos operacionales de mina, planta y venta del producto. Se desarrolla un flujo de caja de ambos proyectos, con la finalidad de obtener indicadores económicos que ayudaran a realizar un posterior análisis de resultado.

### Inversión

Los equipos de carguío y transporte son activos fijos que generan beneficios, por ende esta inversión es del tipo CAPEX. Los flota de equipos que se considera en este apartado, en el caso del transporte, es aquella calculada mediante la simulación, mientras que la flota de equipos de carguío es la que se determinó matemáticamente.

El CAPEX para el proyecto con equipos convencionales se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 28 CAPEX de equipos en operaciones unitarias convencionales (*elaboración propia*)

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b> [MUSD]	<b>Costo Total</b> [MUSD]
<b>Camión CAT 785D</b>	15	2.5	37.5
<b>Pala Hidráulica CAT 6030FS</b>	1	3.5	3.5
		<b>CAPEX</b>	<b>41.0</b>

Es importante señalar que los activos mencionados anteriormente sufren una depreciación anual por su uso o desgaste, esta depreciación es exenta de impuesto a la utilidad (27%). Es necesario calcular este valor debido a que se usará más adelante en el flujo de caja del proyecto.

Tabla 29 Depreciación de equipos mineros convencionales (*elaboración propia*)

<b>Equipo</b>	<b>Costo Total</b> [MUSD]	<b>Años de Depreciación*</b>	<b>Vida útil real</b>	<b>Depreciación Anual</b> [MUSD]
<b>Camión CAT 785D</b>	37.5	9	20	4.2
<b>Pala Hidráulica CAT 6030FS</b>	3.5	9	15	0.4

\*Valor obtenido a través del servicio de impuestos interno(SII, Chile)

El CAPEX para el proyecto con drones se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 30 CAPEX de equipos en operaciones unitarias con drones (*elaboración propia*)

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Dron E. Yo Copter One tone</b>	271	0.25	67.75
<b>Minicargador Bobcat S650</b>	16	0.20	0.80
<b>Alza contenedores OCTB-1124</b>	7	0.01	0.07
		<b>CAPEX</b>	<b>68.62</b>

En la Tabla 31 se presentan las depreciaciones que sufre los equipos en el proyecto con drones:

Tabla 31 Depreciación de equipos para operación con drones (*elaboración propia*)

<b>Equipo</b>	<b>Costo Total</b> [MUSD]	<b>Años de Depreciación*</b>	<b>Vida útil real</b>	<b>Depreciación Anual</b> [MUSD]
<b>Dron E. Yo Copter One tone</b>	67.75	9	20	7.5
<b>Minicargador Bobcat S650</b>	0.8	9	15	0.09
<b>Alza contenedores OCTB-1124</b>	0.07	8	20	0.009

## Ingreso

El ingreso para el proyecto será la venta del producto final. Para esto se considera el tonelaje de mineral extraído, la ley promedio del mineral, la recuperación metalúrgica y precio de venta. En la Tabla 32 se puede observar el ingreso anual de cada proyecto.

Tabla 32 Ingreso anual por venta de cobre de cada proyecto (*elaboración propia*)

	<b>Convencional</b>	<b>Dron</b>
<b>Mineral [Mt]</b>	5.62	5.12
<b>Ley Mineral</b>	0.57%	0.58%
<b>Recuperación Metalúrgica</b>	90%	90%
<b>Precio Cu [USD/lb]</b>	2.8	2.8
<b>Ingreso [USD]</b>	\$178	\$165

## Egresos

Los egresos que se consideran en la presente memoria son costo mina, costo planta, costo de venta de producto. Los costos de planta y venta del proyecto convencional se consideran iguales a los del proyecto con drones, al igual que los costos por operadores de equipos. Mientras que los costos de mina serán calculados en función al coste por rampas y coste de operación de equipos. En relación al último costo mencionado solo toman en consideración aspectos económicos como consumo de combustible y mantenimiento.

De acuerdo con (Rojas, 2009) el transporte y el carguío representan un 40% y 10% de costo porcentual de las operaciones mina respectivamente. Mientras que los servicios de infraestructuras corresponden al 15% del costo total de operación mina. Esto se puede asociar directamente al costo operacional de una rampa en el rajo.

El costo operacional en mina convencional, mencionado en la Tabla 1, corresponde a 3 USD la tonelada, considerando que el diseño para las operaciones unitarias con el dron como equipo de carguío no contempla rampas, el costo operacional mina será un 15% menor respecto a la operación con camiones.

$$3 \times 15\% = 0.45 \text{ USD}/t$$

El consumo de combustible por hora, tanto por equipo de carguío como de transporte se puede apreciar en la Tabla 33. Además, se detalla el tipo de combustible que utiliza cada equipo, el costo del combustible y el costo total de combustible en relación a la flota de equipos.

Tabla 33 Consumo y costos de combustible por equipo (*elaboración propia*)

	<b>Camión</b>	<b>Pala hidráulica</b>	<b>Dron</b>	<b>Minicargador</b>
<b>Consumo [l/h]</b>	130	220	244	10
<b>Tipo de combustible</b>	Diesel	Diesel	Jet	Diesel
<b>Precio del combustible [USD/l]</b>	\$0.43*	\$0.43*	\$0.40*	\$0.43*
<b>Flota</b>	15	1	271	16
<b>Costo total combustible [USD]</b>	\$830	\$94	\$26,205	\$68
<b>Costo combustible C&amp;T**[USD]</b>		\$924		\$26,273

\* El precio presentado en la tabla es un promedio de los últimos 12 meses, a partir de junio de 2019.

\*\* Costo combustible C&T corresponde a las operaciones de carguío y transporte combinadas.

De acuerdo con (Cantalopt, 2017) el costo asociado a combustible en la minería del cobre es de un 3% de los costos operacionales. Es decir, como en la presente memoria se considera un costo operacional mina de 3 USD la tonelada, el 3% de este valor representará el costo por uso de combustible (0.09 USD).

Gracias a los resultados en la Tabla 33, se puede determinar la relación de los costos de combustible para la operación con drones y minicargadores versus la operación convencional con camiones y pala hidráulica. El resultado es el siguiente:

$$relación\ combustible = \frac{26273}{924} = 28.4$$

A partir de la relación obtenida, se puede determinar el costo de combustible por tonelada para la operación sin rampas. Este se calcula multiplicando el costo de combustible del diseño convencional por el factor de relación de los costos de combustible. Dando como resultado lo siguiente:

$$0.09 \times 28.4 = 2.56USD/t$$

De acuerdo a una recopilación de datos, se tiene que el mantenimiento preventivo y correctivo representan el 28% de los costos operacionales de los equipos. Los costos operacionales de los equipos de carguío y transporte corresponden al 50% de los costos totales de operación mina. Dicho lo anterior, se determina que el costo de mantenimiento

para equipos de carguío y transporte convencional (camión minero y pala hidráulica) como un 14% sobre el costo mina.

$$\text{Costo Mantenimiento C\&T} = 3 \times 14\% = 0.42\text{USD}/t$$

Por otra parte, se desarrolló un análisis de mercado para estimar el costo del mantenimiento del dron, obteniendo como resultado un costo de 2,400 USD por año. El costo de mantenimiento del minicargador es de 16 mil USD por año. En la Tabla 29, se muestra el costo de mantenimiento de la flota de equipos por año.

Tabla 34 Costo anual por mantenimiento de flota (*elaboración propia*)

	<b>Dron</b>	<b>Minicargador</b>
<b>Costo anual/equipo</b>	2400 USD	16000
<b>N° flota</b>	271	16
<b>Costo/año</b>	650,400 USD	256,000 USD

Tabla 35 Costo anual de mantenimiento (*elaboración propia*)

	<b>C&amp;T</b>
<b>Costo/t</b>	0.42 USD/t
<b>t/año</b>	16.3 Mt
<b>Costo/año</b>	6.8 MUSD

De la Tabla 34 se puede calcular el total para la operación conjunta de dron y minicargador, obteniendo un total de 0.91 MUDS. Ahora es necesario determinar la relación de costos de mantenimiento para calcular el costo de mantenimiento por tonelada que formará parte del costo operacional para el rajo sin rampas.

$$\text{relación mantenimiento} = \frac{0.91}{6.83} = 0.13$$

$$0.42 \times 0.13 = 0.05\text{USD}/t$$

En la Tabla 36 se puede visualizar el costo mina para el diseño sin rampa, donde se consideran los costos mencionadas anteriormente (rampa, combustible y mantenimiento). El punto de partida para llegar al resultado fue el costo mina del diseño convencional, se le hizo el descuento de los valores que no aplicaban, es decir costos asociados a tareas y equipos que no están presentes y se les adiciona los costos asociados a las operaciones unitarias con dron.

*Tabla 36 Resultado de costo mina para diseño sin rampas (elaboración propia)*

<b>Tipo de costo</b>	<b>Valor</b>
<b>Operacional con rampas</b>	3.00
<b>Asociado a rampas</b>	-0.45
<b>Combustible con rampas</b>	-0.09
<b>Mantenimiento con rampas</b>	-0.42
<b>Combustible sin rampas</b>	2.56
<b>Mantenimiento sin rampas</b>	0.05
<b>Operacional mina sin rampas</b>	<b>4.65</b>

Una vez realizado el cálculo de operación mina para dron, puede determinar los egresos anuales para cada proyecto (Tabla 37).

*Tabla 37 Egreso anual por operación de cada proyecto (elaboración propia)*

	<b>Rajo Convencional</b>	<b>Rajo para dron</b>
<b>Costo Mina [USD/t]</b>	3.00	4.65
<b>Material Total [Mt]</b>	16.26	10.08
<b>Costo mina anual [MUSD]</b>	48.78	46.87
<b>Costo Planta [USD/t]</b>	10.30	10.30
<b>Mineral [Mt]</b>	5.62	5.12
<b>Costo planta anual [MUSD]</b>	57.86	52.78
<b>Costo Venta [USD/ton]</b>	0.50	0.50
<b>Ley Mineral</b>	0.57%	0.58%
<b>Recuperación Metalúrgica</b>	90%	90%
<b>Costo venta anual [MUSD]</b>	0.01	0.01
<b>Egresos [MUSD]</b>	<b>\$106.7</b>	<b>\$99.7</b>

## Flujo de caja

Con los resultados anteriores se procede a realizar el flujo de caja, dando un flujo neto constante por año.

Tabla 38 Flujo de caja anual por operación(*elaboración propia*)

<b>Operación</b>	<b>Convencional</b>	<b>Drones</b>
<b>Toneladas de mineral</b>	5.62	5.12
<b>Toneladas de material</b>	16.26	10.08
<b>Ley de mineral</b>	0.57%	0.58%
<b>Recuperación metalúrgica</b>	90%	90%
<b>Costo mina</b>	3	4.65
<b>Costo planta</b>	10.3	10.30
<b>Costo venta</b>	0.5	0.50
<b>Precio del cobre</b>	2.8	2.8
<b>Ingresos</b>	\$177.89	\$165.1
<b>Egresos</b>	-\$106.65	-\$99.7
<b>Depreciación</b>	-\$4.56	-\$7.6
<b>Utilidad antes de impuesto</b>	\$66.68	\$57.8
<b>Impuesto [27%]</b>	-\$18.00	-\$15.6
<b>Utilidad después de impuesto</b>	\$48.68	\$42.2
<b>Depreciación</b>	\$4.56	\$7.6
<b>Flujo neto</b>	<b>\$53.24</b>	<b>\$49.8</b>

Uno de los indicadores más utilizados en minería es el valor actual neto (VAN), gracias a este indicador se puede ver la rentabilidad proyectada al futuro. En el caso de la presente memoria se proyectará a 10 años ambas operaciones y la tasa de interés mínima aceptable de un 15%. El van de ambos proyecto se puede ver en la Tabla 39. (ver flujo completo en Apéndice 8 para camión y Apéndice 9 para dron)



*Tabla 39 VAN acumulado de operación convencional y con drones (elaboración propia)*

	<b>Convencional[MUSD]</b>	<b>Dron [MUSD]</b>
VAN 0	-41	-69
VAN 1	5	-25
VAN 2	46	12
VAN 3	81	45
VAN 4	111	74
VAN 5	137	98
VAN 6	160	120
VAN 7	180	139
VAN 8	198	155
VAN 9	213	169
<b>VAN 10</b>	<b>226</b>	<b>181</b>

El resultado de otros indicadores económicos existentes, como la tasa interna de retorno (TIR), el periodo de retorno de inversión (PRI) y razón beneficios sobre costos (B/C) se muestran en la Tabla 39.

*Tabla 40 Indicadores económicos según operaciones unitarias (elaboración propia)*

<b>Indicador</b>	<b>Convencional</b>	<b>Dron</b>
<b>TIR</b>	130%	72%
<b>PRI</b>	0.89	1.67
<b>B/C</b>	1.61	1.55

## Análisis de resultados

### Análisis del diseño

De ambos diseños obtenidos en los resultados, para equipos convencionales y para dron, se puede decir que el diseño sin rampas se ajusta de mejor manera al *pit* óptimo entregado por el *software Vulcan*. En la Ilustración 17 se puede observar las diferencias existentes del *pit* óptimo versus el diseño con rampas (convencional) y el diseño sin rampas (dron).

En el diseño convencional se deben extraer 243.9 Mt totales, de las cuales 84.3 Mt corresponde a mineral, 3.3 Mt de *stock* y 156.3 Mt de estéril, con una relación estéril mineral (REM) igual a 1.85, esto quiere decir que para mover una tonelada de mineral es necesario mover 1.85 toneladas de estéril. En el caso del diseño para dron se extrae una totalidad de 151.2 Mt de material, siendo 73.9 Mt de mineral, 3.1 Mt de *stock* y 74.1 de estéril, con una REM igual a 1 aproximadamente, donde para extraer una tonelada de mineral es necesario mover tan solo una tonelada de estéril.

En el diseño sin rampas, se extrae un 38% menos de material estéril respecto al diseño convencional, esto indica un ahorro significativo en relación a costos operacionales de mina. Aunque también es importante señalar que este en diseño se explota aproximadamente un 12% menos de mineral, el cual influye en la cantidad del producto final y por ende en los ingresos.

En relación a la ley media de cobre contenida en ambos diseños se puede decir que la diferencia es mínima. Para el caso con rampas se tiene una ley de cobre media igual a 0.57%, mientras que para el otro caso es de 0.58%. A pesar de que sea mínima la diferencia, es importante indicar esta diferencia, debido a que en algunos casos estas pequeñas diferencias pueden definir si es rentable o no un proyecto.

El plazo del proyecto se calcula mediante la ecuación de Brian Mackenzie (1982). Esta ecuación considera como única variable el tonelaje del mineral, por lo que para ambos caso el proyecto tiene una vida útil de 15 años. En el caso convencional se deben extraer 16.3 Mt

por año, mientras que el diseño para dron se extraen 10 Mt por año, aproximadamente 6.3 Mt por año menos que en el diseño con rampas.

## **Análisis de flota de equipos**

En el diseño convencional se utiliza la pala hidráulica CAT 6030FS como equipo de carguío, con una capacidad de balde igual a 21.6 yd<sup>3</sup>. Mientras que como equipo de transporte de material se ocupa el camión minero CAT 785D, el cual tiene una capacidad nominal de carga igual a 181 t. El tiempo de ciclo de la operación conjunta entre carguío y transporte es de 0.46 h (Tabla 10). La productividad obtenida es de 227.5 t/h.

Para el caso del rajo sin rampas los equipos que se utilizan son el minicargador Bobcat S650 como equipo de carguío con una capacidad de carga de 1.2 t, como equipo de transporte de material es el dron *E.Yo Copter one tone* con una capacidad de carga igual a 0.86 t. El tiempo de ciclo conjunto de ambos equipos es de 0.12 h (Tabla 19). El rendimiento horario de esta operación es de 5.5 t/h.

Mencionado lo anterior se puede afirmar que el tiempo de ciclo del dron es 74% menor respecto al camión, donde en una hora realiza poco más de 8 vueltas mientras que el camión alcanza aproximadamente 2 ciclos por hora. En relación a la productividad, el camión evidentemente tiene un mayor rendimiento en relación al dron, concretamente 41.3 veces mejor.

La flota que se obtuvo para el caso convencional en principio fue de 9 camiones y 1 pala, mientras que en el caso sin rampas fue de 214 drones y 16 minicargadores. Una vez realizada la simulación de las operaciones unitarias de carguío y transporte se obtuvo el porcentaje de utilización de los camiones (61%) y de los drones (79%), a partir de eso resultados se calculó la flota real, la de camiones igual a 15 y drones igual a 271. Para los equipos de carguío se mantuvo su flota inicial en ambos proyectos. Cabe señalar que en el caso de transporte de material con drones es necesario utilizar un alza contenedor, el número de equipos que cumplen con la producción es igual a 7. Distribuidos en los puntos de destino, planta 3, botadero 3 y en *stock pile* 1.

La inversión inicial requerida de ambos proyectos viene dada en función de su flota. El resultado se puede ver en la Tabla 28 (caso convencional) y Tabla 30 (caso dron). A partir de estos resultados se puede señalar de que la inversión (CAPEX) en la operación con drones es de un 67% mayor, en relación a la operación convencional.

## **Análisis de evaluación económica**

Los ingresos fueron obtenidos del producto entre el mineral extraído, ley de cobre, recuperación metalúrgica y precio de venta del cobre (Tabla 32). Para el proyecto con equipos típicos se obtiene un ingreso anual de 178 MUSD, en el caso de los drones su ingreso es de 165 MUSD. En relación a esto, se puede decir que el proyecto con drones tiene un 7.3% menor de ingresos respecto al caso convencional.

Los costos de mina, planta y venta forman parte de los egresos en ambos casos. Los costos de planta y venta del proyecto convencional se consideran iguales a los del proyecto con drones, a diferencia del costo mina, el cual varió debido a que los equipos de carguío y transporte son completamente diferentes.

Los costos que influyeron en el costo total mina fueron aquellos asociados a rampas, combustible y mantenimiento de equipos. Se tomó como base el costo mina de los equipos convencionales (Tabla 1), a partir de este valor se calcularon los costos de operación con drones. En cuanto a las rampas, se tiene que un 15% menos en costos, debido a que se ahorra la construcción y mantenimiento de estas. Además, se tiene que la operación con drones gasta 28.4 veces más combustible que la operación con equipos convencionales. Por último se tiene que el costo de mantenimiento del dron es 88% menor respecto al proyecto convencional. El costo mina para las operaciones unitarias con drones obtenido es de 4.65 USD/t (Tabla 36), un 55% mayor en función de los 3 USD/t de la operación con camiones.

Los egresos totales para ambos se pueden ver en la Tabla 37, donde el caso sin rampas tiene un 6.6% menor de egresos respecto al proyecto con camiones.

El principal indicador económico utilizado en la presente memoria es el VAN, el cual indica la rentabilidad del proyecto, mediante proyecciones de flujos futuros. En el presente informe la proyección fue a 10 años y con una tasa de descuento igual al 15%, dando un VAN de 226 y

181 MUSD para el proyecto convencional y proyecto con drones respectivamente (Tabla 39). Esto quiere decir que ambos proyectos al décimo año serán rentables, sin embargo el proyecto con drones tiene un 20% menos de utilidad respecto al proyecto con camiones mineros y pala hidráulica.

En relación al resultado de los otros indicadores económicos (Tabla 40) podemos decir que la TIR en ambos casos favorece el proyecto, aunque no de la misma manera, ya que la rentabilidad de la operación con drones es de un 58% menor respecto al otro proyecto.

En cuanto al PRI se tiene que el proyecto con equipos convencionales recupera la inversión antes de que pase un año desde la ejecución de proyecto, mientras que en el caso del proyecto con drones recupera la inversión inicial poco después del paso de un año y medio.

Por otra parte se tiene el indicador beneficio sobre costos (B/C), el cual indica la relación de ingresos sobre los gastos del proyecto. En ambos casos el B/C es mayor a 1, lo cual indica rentabilidad, si embargo el proyecto con drones tiene un 3.7% menor de B/C respecto al otro.

Finalmente podemos afirmar que ambos proyectos son rentables, pero el proyecto con drones tiene menores ganancias, entonces ahora surge la siguiente interrogante: ¿qué características debe tener un dron para que compita económicamente con un proyecto convencional? La respuesta a esta duda se responde realizando el ejercicio inverso al procedimiento de los resultados, de esta manera se tiene que la capacidad del dron debe ser igual a 1.3 t, de esta manera la flota disminuiría de 271 a 147 equipos, generando menos costos tales como de mantenimiento y combustible. Otra manera para que el proyecto tenga un VAN igual a del caso con camiones, es mantener la flota de 271 equipos, pero con un consumo de combustible igual a 132 l/h en vez de los actuales 244 l/h.

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones

De acuerdo con lo desarrollado en la presente memoria, los dos diseños realizados son considerablemente diferentes. En primer lugar, en uno no se consideran rampas, lo cual genera operaciones unitarias completamente diferentes a las que acostumbramos a ver en minería a cielo abierto, la cual tiene el foco de una minería con funcionamiento telecomandado y autónomo.

Por otro lado, en cuanto al material a extraer en el diseño sin rampas, en comparación al convencional se extrae menos estéril lo cual genera un costo bastante menor asociado a la remoción de este. Además, se puede decir que generará un menor impacto ambiental y paisajístico, debido a que tanto el rajo como el botadero serán de menor envergadura.

Por lo que se refiere a tiempos de ciclos de equipos, los drones tienen un mayor provecho, debido a que estos entran de manera diagonal desde la superficie a la frente de trabajo en el rajo (vista transversal al rajo). Sin embargo, su productividad por hora es menor a la del camión, debido a que su capacidad de carga es bastante menor. En otras palabras, para poder cumplir con la productividad requerida, la flota de equipos de drones debe ser mucho mayor que la de camiones.

En cuanto al CAPEX de la flota total, la inversión de operaciones unitarias con drones supera a la de los equipos convencionales. Sin embargo tomando en cuenta solo un equipo, el dron representa una inversión reducida, es decir en caso de que se tenga alguna pérdida total de este, ya sea por su vida útil u otro evento, el reemplazo es menor.

En relación a la operación sin rampas se tiene un mayor costo mina por tonelada removida, debido a que el costo operacional de los drones supera a la de los camiones, donde el consumo de combustible por equipo es el principal costo en la operación con aeronaves. A pesar de lo mencionado anteriormente, el dron tiene menos egresos totales debido a que tiene que remover una cantidad de material menor.

Con respecto a la utilidad se puede concluir que una operación minera a cielo abierto es económicamente factible con drones. Si bien la operación convencional tiene mayores ganancias, esta diferencia podría ser igual a cero realizando mejoras de capacidad de carga y/o reduciendo el consumo de combustible por hora de vuelo.

Como ya sabemos en minería a cielo abierto, a medida que se avanza en el tiempo la operatividad de los equipos de carguío y transporte se vuelve más compleja, ya que el área de trabajo del equipo de carguío se reduce, por otra parte las distancias y tiempos de ciclo de los equipos de transporte aumentan considerablemente, gracias a las operaciones unitarias con drones y minicargadores estas dificultades se verán reducidas, debido a que no se necesitan extensas áreas de trabajo, y los tiempos de ciclos de transporte son mucho menor.

En los últimos años la industria de drones de carga pesada ha crecido enormemente, lo cual es favorable para la minería, ya que puede solucionar diversas problemáticas, tal como se expuso en la presente investigación. A nivel mundial las tecnologías avanzan a pasos agigantados, debemos ser parte de estos cambios e innovar en la industria optimizando los procesos mineros.

## **Recomendaciones**

- 1- Siguiendo el mismo procedimiento, investigar cómo se comportaría una flota mixta a los largo del proyecto, o bien usar una flota de camiones al inicio del proyecto, a mitad una flota mixta y al final de la explotación minera una flota de drones.
- 2- Evaluar costos asociados a tronadura, en función de la granulometría requerida para ser transportada por el dron. Además se pueden incluir costos en planta chancadora, ya que el material de llegada tiene un menor tamaño.
- 3- Evaluar impacto ambiental y económico, considerando etapa de cierre de faena y remediación de suelos posterior a la explotación con drones. Además dimensionar la diferencia del área utilizada por el botadero en una operación con drones y los costos asociados a este.
- 4- Investigar normativa aérea chilena o del país en donde se piensa realizar un proyecto minero con drones.

## Bibliografía

- AeroVironment. (2020). *avinv.com*.
- Bobcat. (2012). *Minicargador S650*.
- Bozorgebrahimi, E., Hall, R. A., & Blackwell, G. H. (2003). Sizing equipment for open pit mining. *Mining Technology*.
- Cantallopis, J. (2017). *Chilean copper mining costs*. Cochilco.
- Castillo, L. (2009). *Modelos de optimización para la planificación minera a cielo abierto*.
- Caterpillar Inc. (2010). *785D Camión minero*.
- Caterpillar Inc. (2016). *6030FS Pala hidráulica*.
- Coos Bú, R. (1994). *Simulación, Un enfoque práctico*. Monterrey: Limusa, Noriega Editores.
- Delair. (2020). *delair.aero*.
- Díaz, C. (2017). *Planificación minera a cielo a bierto considerando diseño optimo de rampas*.
- DJI. (2020). <https://www.dji.com/mavic>.
- e.Yo Copter. (2018). *One tone copter*.
- González, V. (2018). *Modelo evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en compañía Doña Inés de Collahuasi*.
- Herrera, J. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Madrid.
- Jélvez, E. (2017). *Metodología multietapa para la planificación de la producción de largo plazo en minas a rajo abierto bajo incertidumbre geológica*.
- Lee, S., & Choi, Y. (2016). Reviews of unmanned aerial vehicle(drone) technology trends and its applications in the minning industry. *Geosystem Engineering*, 198.
- Le-Feaux, R., Galdames, B., & Vázques, A. (2008). *Diseño y operaciones de minas a cielo abierto*.
- Maptek Pty Ltd. (2019). *Acerca de Maptek*. Obtenido de <https://www.maptek.com>
- Mecalux logismarket. (2020). *Alza contenedor multinorma OCTB-1124*.
- Moraga, C. (2017). *Carguío y Transporte, Apuntes de Curso Arranque, Transporte y Carguío*.
- Newman, A., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). *A Review of Operations Research in Mine Planning*.



- Parra, A. (2006). *Generación y Aplicación de un sistema de análisis para planes de producción.*
- Parra, A. (2015). *Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicos.*
- Ramírez, S. (2018). Análisis de sensibilidad del factor de producción de camiones respecto al tiempo de acarreo de material estéril en la empresa Drummond LTD. Sogamoso, Boyaca, Colombia.
- Rojas Seguel, D., & Castillo Dintrans, E. (2015). *Caracterización de los costos de la gran minería del cobre.*
- Rojas, M. (2009). *Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto.* Santiago.
- Rubio, E. (2008). *Planificación de minas de acuerdo al contexto. Apuntes del curso Explotación de minas.*
- Sánchez, M. (2017). *Uso y aplicaciones de drones en minería.* Manresa.
- Tapia, E. (2017). *Carguio y transporte.* Antofagasta.
- Toledo, C. (2010). *Tamaño óptimo de explotación en función de parámetros económicos.*
- Vargas, M. (2011). *Modelo de planificación minera de corto y mediano plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla.*

# Apéndice

Apéndice 1: Tabla con detalle del desplazamiento de camión por banco

<b>Banco</b>	<b>cota</b>	<b>Rajo</b>	<b>Rampa</b>	<b>Botadero</b>	<b>Planta</b>	<b>Stock Pile</b>	<b>%</b>	<b>%Estéril</b>	<b>%Mineral</b>	<b>%Stock</b>	<b>Ponderado</b>
1	640	850	0	3000	1500	1000	3.2%	97.5%	2.0%	0.5%	122
2	630	825	100	3000	1500	1000	6.2%	93.1%	5.8%	1.1%	238
3	620	810	200	3000	1500	1000	5.9%	84.6%	12.5%	2.9%	223
4	610	795	300	3000	1500	1000	5.7%	79.3%	17.0%	3.7%	214
5	600	775	400	3000	1500	1000	5.4%	77.1%	19.9%	3.0%	207
6	590	765	500	3000	1500	1000	5.2%	75.5%	22.0%	2.5%	202
7	580	745	600	3000	1500	1000	4.95%	74.1%	24.1%	1.8%	195
8	570	730	700	3000	1500	1000	4.7%	72.6%	25.8%	1.6%	189
9	560	700	800	3000	1500	1000	4.5%	71.0%	26.8%	2.2%	182
10	550	680	900	3000	1500	1000	4.3%	69.4%	28.5%	2.1%	175
11	540	655	1000	3000	1500	1000	4.1%	67.4%	31.1%	1.6%	169
12	530	640	1100	3000	1500	1000	3.8%	65.2%	33.6%	1.1%	162
13	520	625	1200	3000	1500	1000	3.6%	63.3%	35.7%	0.9%	155
14	510	613	1300	3000	1500	1000	3.4%	61.5%	37.8%	0.7%	148
15	500	598	1400	3000	1500	1000	3.2%	59.3%	40.4%	0.3%	141
16	490	585	1500	3000	1500	1000	3.0%	56.9%	43.1%	0.0%	135
17	480	570	1600	3000	1500	1000	2.8%	55.0%	45.0%	0.1%	128
18	470	554	1700	3000	1500	1000	2.7%	53.0%	46.6%	0.3%	121
19	460	535	1800	3000	1500	1000	2.5%	51.1%	48.0%	0.8%	114
20	450	505	1900	3000	1500	1000	2.3%	48.9%	50.5%	0.7%	107
21	440	480	2000	3000	1500	1000	2.1%	45.8%	54.0%	0.2%	100
22	430	465	2100	3000	1500	1000	2.0%	42.4%	57.5%	0.1%	93
23	420	451	2200	3000	1500	1000	1.8%	39.1%	60.9%	0.1%	86
24	410	430	2300	3000	1500	1000	1.7%	35.7%	64.3%	0.1%	80
25	400	415	2400	3000	1500	1000	1.5%	31.8%	68.1%	0.1%	73
26	390	381	2500	3000	1500	1000	1.4%	29.2%	70.7%	0.1%	67
27	380	362	2600	3000	1500	1000	1.3%	27.3%	72.7%	0.0%	61
28	370	341	2700	3000	1500	1000	1.1%	26.1%	73.7%	0.1%	56
29	360	330	2800	3000	1500	1000	1.0%	24.8%	75.0%	0.2%	50
30	350	310	2900	3000	1500	1000	0.9%	23.2%	76.4%	0.4%	45
31	340	285	3000	3000	1500	1000	0.8%	21.5%	77.9%	0.5%	40
32	330	258	3100	3000	1500	1000	0.7%	17.6%	81.8%	0.6%	35
33	320	241	3200	3000	1500	1000	0.6%	12.7%	87.0%	0.3%	30
34	310	222	3300	3000	1500	1000	0.5%	11.4%	88.2%	0.3%	25
35	300	200	3400	3000	1500	1000	0.4%	10.3%	89.0%	0.7%	21
36	290	168	3500	3000	1500	1000	0.3%	8.4%	91.2%	0.3%	17
37	280	148	3600	3000	1500	1000	0.2%	3.3%	96.7%	0.0%	12
38	270	123	3700	3000	1500	1000	0.1%	1.2%	98.8%	0.0%	5

Apéndice 2: Tabla con detalle del desplazamiento de dron en rajo con rampas.

<b>Banco</b>	<b>Rajo</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Diagonal</b>	<b>Superficie</b>	<b>Ponderado</b>
<b>1</b>	780	0	390.3	2.94	111
<b>2</b>	757	10	390.8	2.83	208
<b>3</b>	743	20	391.6	2.62	184
<b>4</b>	730	30	392.6	2.48	167
<b>5</b>	711	40	393.9	2.43	156
<b>6</b>	702	50	395.4	2.40	147
<b>7</b>	684	60	397.1	2.37	138
<b>8</b>	670	70	399.2	2.33	130
<b>9</b>	642	80	401.4	2.29	121
<b>10</b>	624	90	403.9	2.25	113
<b>11</b>	601	100	406.6	2.21	106
<b>12</b>	587	110	409.5	2.17	98
<b>13</b>	574	120	412.7	2.12	91
<b>14</b>	563	130	416.1	2.09	84
<b>15</b>	549	140	419.7	2.05	78
<b>16</b>	537	150	423.5	2.00	72
<b>17</b>	523	160	427.5	1.97	66
<b>18</b>	508	170	431.7	1.94	61
<b>19</b>	491	180	436.0	1.92	57
<b>20</b>	463	190	440.6	1.90	52
<b>21</b>	440	200	445.3	1.87	48
<b>22</b>	427	210	450.2	1.85	44
<b>23</b>	414	220	455.3	1.83	40
<b>24</b>	395	230	460.6	1.80	37
<b>25</b>	381	240	466.0	1.77	33
<b>26</b>	350	250	471.5	1.75	30
<b>27</b>	332	260	477.2	1.73	27
<b>28</b>	313	270	483.0	1.70	24
<b>29</b>	303	280	489.0	1.67	21
<b>30</b>	284	290	495.1	1.65	19
<b>31</b>	262	300	501.3	1.64	16
<b>32</b>	237	310	507.7	1.64	14
<b>33</b>	221	320	514.1	1.64	13
<b>34</b>	204	330	520.7	1.62	11
<b>35</b>	184	340	527.4	1.58	9
<b>36</b>	154	350	534.2	1.55	7
<b>37</b>	136	360	541.0	1.53	6
<b>38</b>	115	370	548.0	1.52	3

Apéndice 3: Tabla con detalle del desplazamiento de dron en rajo sin rampas.

<b>Banco</b>	<b>Rajo</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Diagonal</b>	<b>Superficie</b>	<b>Ponderado</b>
1	850	0	425.3	2.96	108
2	825	10	425.7	2.89	207
3	810	20	426.4	2.75	189
4	795	30	427.4	2.67	176
5	775	40	428.5	2.64	167
6	765	50	429.9	2.62	158
7	745	60	431.6	2.60	150
8	730	70	433.4	2.58	142
9	700	80	435.5	2.55	134
10	680	90	437.8	2.53	127
11	655	100	440.3	2.50	119
12	640	110	443.0	2.47	112
13	625	120	445.9	2.45	105
14	613	130	449.1	2.42	98
15	598	140	452.4	2.39	92
16	585	150	455.9	2.35	85
17	570	160	459.6	2.32	79
18	554	170	463.5	2.29	74
19	535	180	467.6	2.26	68
20	505	190	471.9	2.23	62
21	480	200	476.3	2.19	57
22	465	210	480.9	2.13	52
23	451	220	485.6	2.09	47
24	430	230	490.6	2.03	42
25	415	240	495.6	1.98	38
26	381	250	500.8	1.94	34
27	362	260	506.2	1.91	30
28	341	270	511.7	1.89	27
29	330	280	517.3	1.87	24
30	310	290	523.1	1.85	21
31	285	300	529.0	1.82	18
32	258	310	535.0	1.76	16
33	241	320	541.2	1.69	13
34	222	330	547.4	1.67	11
35	200	340	553.8	1.65	9
36	168	350	560.2	1.62	7
37	148	360	566.8	1.55	5
38	123	370	573.5	1.52	2

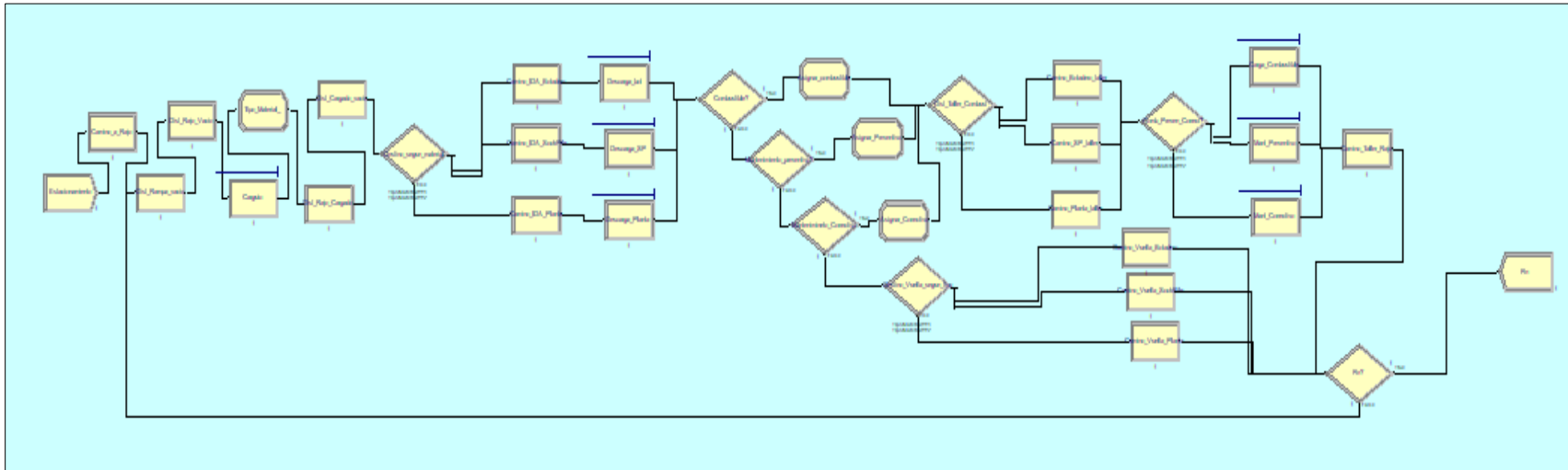
Apéndice 4: Datos utilizados en simulación de camiones.

<b>Actividad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Estacionamiento</b>	Entrada	unif(3, 7) min
<b>Estacionamiento-Rajo</b>	Ruta	2 min
<b>Rampa vacío</b>	Ruta	3.8 min
<b>Rajo vacío</b>	Ruta	2.1 min
<b>Carguío</b>	Proceso	unif(200, 220) s
<b>Tipo Material</b>	Asignación	64%=1, 1%=2, 35%=3
<b>Rajo Cargado</b>	Ruta	2.2 min
<b>Rampa Cargado</b>	Ruta	3.8 min
<b>Destino material</b>	Decisión	1=Botadero,2=Stock Pile, 3=Planta
<b>Ida Botadero</b>	Ruta	7 min
<b>Ida Stock Pile</b>	Ruta	2 min
<b>Ida Planta</b>	Ruta	4 min
<b>Descarga Botadero</b>	Proceso	0.6 min
<b>Descarga Stock Pile</b>	Proceso	0.6 min
<b>Descarga Planta</b>	Proceso	0.6 min
<b>Combustible</b>	Decisión	3%
<b>Mant. Preventivo</b>	Decisión	0.02%
<b>Mant. Correctivo</b>	Decisión	5%
<b>Botadero-Taller</b>	Ruta	2 min
<b>Stock Pile-Taller</b>	Ruta	2 min
<b>Planta-Taller</b>	Ruta	1 min
<b>Carga combustible</b>	Proceso	unif(40,60) min
<b>Mant. Preventivo</b>	Proceso	unif(12,24) h
<b>Mant. Correctivo</b>	Proceso	unif(1,4) h
<b>Vuelta Taller-Rajo</b>	Ruta	4 min
<b>Vuelta Botadero-Rajo</b>	Ruta	6 min
<b>Vuelta Stock Pile-Rajo</b>	Ruta	2 min
<b>Vuelta Planta-Rajo</b>	Ruta	3 min

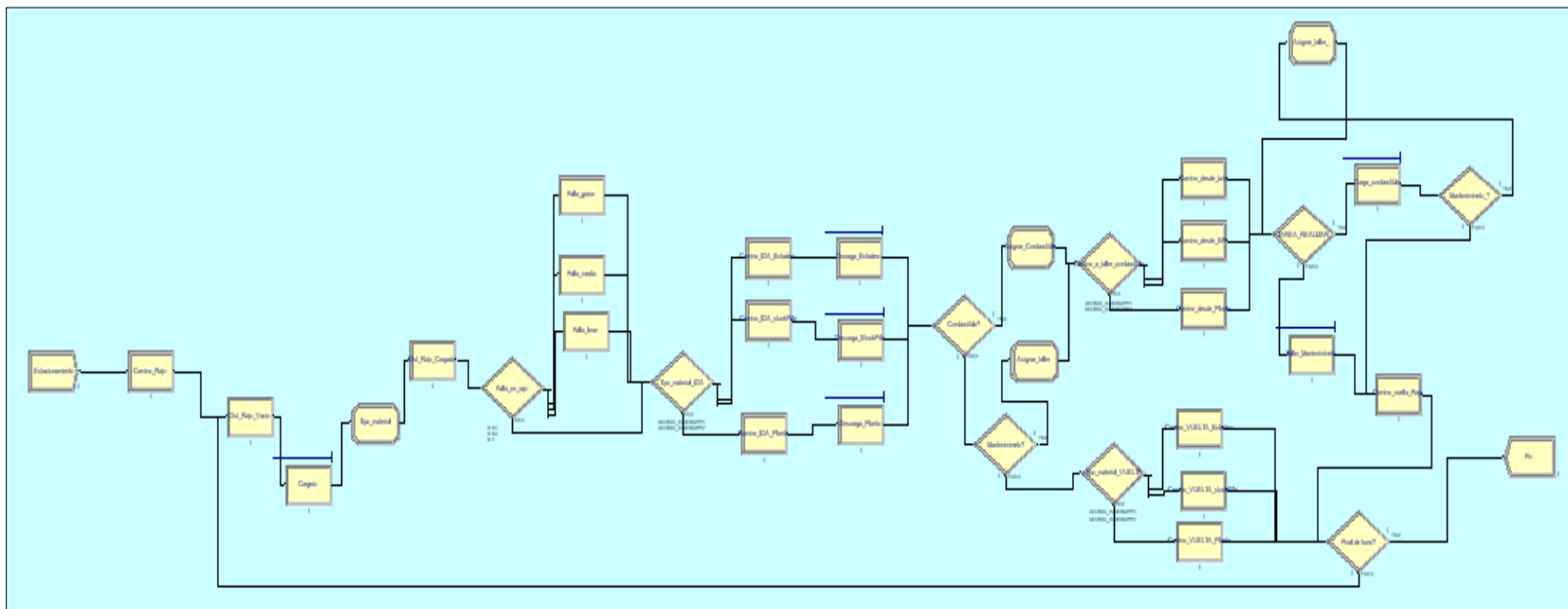
Apéndice 5: Datos utilizados en simulación de drones.

<b>Actividad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Estacionamiento</b>	Entrada	unif(2,10)s
<b>Estacionamiento-Rajo</b>	Ruta	1 min
<b>Rajo vacío</b>	Ruta	38 s
<b>Carguío</b>	Proceso	unif(25,35)s
<b>Tipo Material</b>	Asignación	49%=1, 2%=2, 49%=3
<b>Rajo Cargado</b>	Ruta	43 s
<b>Falla en rajo</b>	Decisión	0.01%=Grave 0.03%=Media 1%=Leve
<b>Falla Grave</b>	Proceso	unif(4, 12) h
<b>Falla Media</b>	Proceso	unif(1, 4) h
<b>Falla Leve</b>	Proceso	unif(15, 60)min
<b>Destino material</b>	Decisión	1=botadero, 2=stock pile, 3=Planta
<b>Ida Botadero</b>	Ruta	216 s
<b>Ida Stock Pile</b>	Ruta	72 s
<b>Ida Planta</b>	Ruta	108 s
<b>Descarga Botadero</b>	Proceso	unif(10, 15) s
<b>Descarga Stock Pile</b>	Proceso	unif(10, 15) s
<b>Descarga Planta</b>	Proceso	unif(10, 15) s
<b>Combustible</b>	Decisión	11%
<b>Mant. Preventivo</b>	Decisión	0.10%
<b>Botadero-Taller</b>	Ruta	60 s
<b>Stock Pile-Taller</b>	Ruta	60 s
<b>Planta-Taller</b>	Ruta	30 s
<b>Carga Combustible</b>	Proceso	unif(5, 109) min
<b>Mant. Preventivo</b>	Proceso	unif(12, 24)
<b>Vuelta Taller-Rajo</b>	Ruta	2 min
<b>Vuelta Botadero-Rajo</b>	Ruta	3 min
<b>Vuelta Stock Pile-Rajo</b>	Ruta	1 min
<b>Vuelta Planta-Rajo</b>	Ruta	1.5 min

Apéndice 6: Diagrama de simulación de camiones en software Arena.



Apéndice 7: Diagrama de simulación de drones en software Arena.





Apéndice 8: Flujo de caja proyectado a 10 años para proyecto con camiones.

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Toneladas de mineral [Mt]</b>		5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62
<b>Toneladas de material [Mt]</b>		16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26	16.26
<b>Ley de mineral</b>		0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%
<b>Ley de concentrado</b>		30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
<b>Recuperación metalúrgica</b>		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
<b>Costo mina [UDS/t]</b>		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>Costo planta [UDS/t]</b>		10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
<b>Costo venta [UDS/t]</b>		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>Precio del cobre [UDS/lb]</b>		\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	\$2.80	2.8
<b>Ingresos [MUSD]</b>		\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	\$177.89	177.89
<b>Egresos [MUSD]</b>		-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65	-106.65
<b>Depreciación [MUSD]</b>		-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	-\$4.56	0
<b>Utilidad antes de impuesto [MUSD]</b>		\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	\$66.68	71.24
<b>Impuesto [27%][MUSD]</b>		-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-\$18.00	-19.23
<b>Utilidad después de impuesto [MUSD]</b>		\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	\$48.68	52.01
<b>Depreciación [MUSD]</b>		\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	\$4.56	0
<b>CAPEX [MUSD]</b>	-41.00										
<b>Flujo neto [MUSD]</b>	-41.00	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	\$53.24	52.01
<b>Valor actual [MUSD]</b>		\$46.29	\$40.25	\$35.00	\$30.44	\$26.47	\$23.02	\$20.01	\$17.40	\$15.13	12.85
<b>VAN Acumulado[MUSD]</b>	<b>-41.00</b>	<b>5.29</b>	<b>45.55</b>	<b>80.55</b>	<b>110.99</b>	<b>137.45</b>	<b>160.47</b>	<b>180.48</b>	<b>197.88</b>	<b>213.02</b>	<b>225.87</b>

Apéndice 9: Flujo de caja proyectado a 10 años para proyecto con drones.

<b>Año</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Toneladas de mineral [Mt]</b>		5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
<b>Toneladas de material [Mt]</b>		10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08
<b>Ley de mineral</b>		0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%	0.58%
<b>Ley de concentrado</b>		30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
<b>Recuperación metalúrgica</b>		90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
<b>Costo mina [UDS/t]</b>		4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65
<b>Costo planta [UDS/t]</b>		10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
<b>Costo venta [UDS/t]</b>		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>Precio del cobre [UDS/lb]</b>		2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
<b>Ingresos [MUSD]</b>		165.11	165.11	165.11	165.11	165.11	165.11	165.11	165.11	165.11	165.11
<b>Costos [MUSD]</b>		-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66	-99.66
<b>Depreciación [MUSD]</b>		-7.63	-7.63	-7.63	-7.63	-7.63	-7.63	-7.63	-7.63	-7.62	0.00
<b>Utilidad antes de impuesto</b>		57.83	57.83	57.83	57.83	57.83	57.83	57.83	57.83	57.84	65.45
<b>Impuesto [27%]</b>		-15.61	-15.61	-15.61	-15.61	-15.61	-15.61	-15.61	-15.61	-15.62	-17.67
<b>Utilidad después de impuesto [MUSD]</b>		42.21	42.21	42.21	42.21	42.21	42.21	42.21	42.21	42.22	47.78
<b>Depreciación [MUSD]</b>		7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.62	0.00
<b>CAPEX [MUSD]</b>	-68.62										
<b>Flujo neto [MUSD]</b>	-68.62	49.84	49.84	49.84	49.84	49.84	49.84	49.84	49.84	49.84	47.78
<b>Valor actual [MUSD]</b>		43.34	37.69	32.77	28.50	24.78	21.55	18.74	16.29	14.17	11.81
<b>VAN acumulado[MUSD]</b>	<b>-68.62</b>	<b>-25.28</b>	<b>12.40</b>	<b>45.17</b>	<b>73.67</b>	<b>98.45</b>	<b>119.99</b>	<b>138.73</b>	<b>155.02</b>	<b>169.19</b>	<b>181.00</b>

