



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“IMPACTO DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL CON EL USO DE SOLVER EN LA OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE CARGUÍO-ACARREO DE MINERAL EN LA MINA LAGUNAS NORTE, LA LIBERTAD, 2017”

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Miguel Ángel Campos Vásquez

Bach. Rolan Diesel Ricra Quispe

Asesor:

Ing. Roberto Severino Gonzáles Yana

Cajamarca – Perú

2017

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, APRUEBAN la tesis desarrollada por los Bachilleres Miguel Ángel Campos Vásquez y Rolan Diesel Ricra Quispe, denominada:

“IMPACTO DE LA PROGRAMACION LINEAL CON EL USO DE SOLVER EN LA OPTIMIZACION DE LAS OPERACIONES DE CARGIO – ACARREO DE MINERAL EN LA MINA LAGUNAS NORTE, LA LIBERTAD, 2017”

Ing. Roberto Severino Gonzáles Yana
ASESOR

Ing. José Alfredo Siveroni Morales
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Manuel Oscar Zambrano Chilón
JURADO

Ing. Shonel Miguel Cáceres Pérez
JURADO

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, principalmente por darme salud, guiarme por el camino del bien y darme fuerzas día a día para que a pesar de los obstáculos pueda luchar por conseguir mis metas.

A mis padres y hermanos por todo el amor y apoyo incondicional que me brindaron siempre, sobre todo por creer en mi capacidad.

Miguel Ángel Campos Vásquez

Para triunfar en la vida no es importante llegar primero, para triunfar hay que llegar. Al culminar uno de mis objetivos dedico la presente Tesis de Grado a:

Dios por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por darme fuerza para no desfallecer ante las adversidades y vencer todos los obstáculos.

Mi padre Eduardo Ricra, que aún en tu último aliento de vida no dudaste que lograría el objetivo de ser profesional, y desde el cielo me has guiado en este camino escabroso, lleno de dificultades.

Rolan Diésel Ricra Quispe

AGRADECIMIENTO

A mi padre y madre, ejemplos de orientación, trabajo y preocupación, siento emoción por la bondad con que me han conducido en el áspero camino de la vida y formación profesional, porque en todo momento me apoyaron para ser una persona de bien.

A nuestros profesores de la UPN y especialmente a nuestro asesor el Ing. Roberto Severino González Yana por la orientación, aporte, seguimiento y supervisión continua durante la realización de ésta Tesis.

Miguel Ángel Campos Vásquez

Muy especialmente a mi madre Sonia Quispe a quien admiro mucho, mami gracias por todo lo que me has dado, gracias por amarme tanto, le doy gracias a Dios por tenerte y ojalá Dios nos dé mucha más vida para seguir estando juntos éste triunfo es tuyo...te amo mami gracias.

Mis hermanos y hermanas por la lucha incansable de ayudarme a seguir adelante, por el tiempo que nunca podré devolverles, pero sí agradecerles.

A toda mi familia que de una forma u otras fueron indispensables para alcanzar el éxito en éste proceso, por sus atenciones, maravillosos consejos y aliento, gracias.

Rolan Diesel Ricra Quispe

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
APROBACIÓN DE LA TESIS.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Justificación	13
1.3.1. <i>Justificación teórica</i>	13
1.3.2. <i>Justificación práctica</i>	13
1.3.3. <i>Justificación valorativa</i>	13
1.3.4. <i>Justificación académica</i>	13
1.4. Limitaciones	13
1.5. Objetivos.....	14
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Bases Teóricas	17
2.2.1. <i>Programación Lineal</i>	17
2.2.2. <i>Formulación de un modelo de Programación Lineal</i>	20
2.2.3. <i>Problema General de Programación Lineal</i>	21

2.2.4.	<i>Descripción de SOLVER</i>	22
2.2.4.1.	<i>Cargar el Complemento SOLVER</i>	22
2.2.4.2.	<i>Optimización con SOLVER</i>	23
2.3.	Definición de términos básicos.....	27
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS		31
3.1.	Formulación de la hipótesis.....	31
3.2.	Operacionalización de variables	31
3.2.1.	<i>Variables Independientes</i>	31
3.2.2.	<i>Variables Dependientes</i>	31
CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS		33
4.1.	Tipo de diseño de investigación	33
4.2.	Material	33
4.2.1.	<i>Unidad de estudio</i>	33
4.2.2.	<i>Población</i>	33
4.2.3.	<i>Muestra</i>	33
4.2.4.	<i>Técnicas de recolección y análisis de datos</i>	33
4.2.4.1.	<i>Instrumentos</i>	33
4.2.4.2.	<i>Procedimientos</i>	34
CAPÍTULO 5. DESARROLLO		35
5.1.	Ubicación	35
5.2.	Fisiografía	36
5.3.	Geología	36
5.3.1.	<i>Geología Regional</i>	36
5.3.2.	<i>Geología Local y Mineralización</i>	38
5.3.3.	<i>Estratigrafía</i>	38
5.3.4.	<i>Estructura mineralizada</i>	43
5.3.5.	<i>Epitermal de baja Sulfuración</i>	44
5.3.6.	<i>Epitermal de Alta Sulfuración</i>	44
5.4.	Clasificación del Mineral	47
5.5.	Método de Minado	47
5.6.	Procesamiento de Mineral	47
5.7.	Optimización de la Operación de Carguío-Acarreo	48
5.7.1.	<i>Equipos y Productividad</i>	48
5.7.2.	<i>Descripción del Proceso de Carguío-Acarreo</i>	51
5.7.3.	<i>Toma de Datos de Campo</i>	52
5.7.4.	<i>Optimización y aplicación de la Programación Lineal</i>	60

CAPÍTULO 6. RESULTADOS	63
6.1. Ingreso de datos en la hoja de cálculo EXCEL.....	63
6.2. Ejecución del complemento SOLVER	64
6.3. Reporte de Solución generada por SOLVER	65
6.4. Visualización de la solución en EXCEL	66
6.5. Informe de Sensibilidad.....	67
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN	69
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS	72

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Operacionalización de Variables Independiente	31
Tabla N° 2. Operacionalización de Variables Dependiente.....	32
Tabla N° 3. Clasificación del Mineral	47
Tabla N° 4. Cuadro de Productividad de la Pala PC 4000-6.....	49
Tabla N° 5. Cuadro de productividad del Cargador WA 1200.....	50
Tabla N° 6. Registro de tiempos NIVEL 4160. PALA hacia la chancadora.....	53
Tabla N° 7. Registro de tiempos NIVEL 4070.CARGADOR hacia la chancadora.....	54
Tabla N° 8. Registro de tiempos NIVEL 4040. (CARGADOR) hacia chancadora	55
Tabla N° 9. Cuadro de producción de plan semanal.....	56
Tabla N° 10. Cuadro de tiempos Sistema Tradicional.....	56
Tabla N° 11. Costos de Acarreo	56
Tabla N° 12. Registro de tiempos Pala-Cargador Nivel 4160 hacia Chancadora	58
Tabla N° 13. Cuadro de tiempos.....	59
Tabla N° 14. Productividad del Sistema Propuesto.....	59
Tabla N° 15. Costos asociados al sistema propuesto	60
Tabla N° 16. Cuadro de ciclos máximos y mínimos	60

NDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1. Configuración de Solver	23
Figura N° 2. Variables de decisión y Función Objetivo	25
Figura N° 3. Restricciones del modelo.....	25
Figura N° 4. Parámetros de Solver	26
Figura N° 5. Opciones de Solver.....	26
Figura N° 6. Resultados de Solver.....	27
Figura N° 7. Metodología de la Investigación de Operaciones	34
Figura N° 8. Mapa de Ubicación de Lagunas Norte	35
Figura N° 9. Geología Regional Lagunas Norte	37
Figura N° 10. Geología Local Lagunas Norte	40
Figura N° 11. Geología de la Propiedad Lagunas Norte	41
Figura N° 12. Columna Estratigráfica Lagunas Norte	42
Figura N° 13. Domo Shulcahuanca vista Pit Lagunas Norte.....	43
Figura N° 14. Epitermales de Baja y alta Sulfuración.....	46
Figura N° 15. KOMATSU PC 4000-6.....	49
Figura N° 16. KOMATSU WA 1200	50
Figura N° 17. CAMION KOMATSU 730E	51
Figura N° 18. Sistema Tradicional de Carguío - Acarreo	52
Figura N° 19. Sistema Propuesto.....	57
Figura N° 20. Distribución de Equipos con el sistema propuesto	61
Figura N° 21. Ingreso de datos del problema en EXCEL	63
Figura N° 22. Interface de Ingreso de datos de SOLVER	64
Figura N° 23. Informe de Solución de SOLVER.....	65
Figura N° 24. Visualización de la solución en EXCEL.....	66
Figura N° 25. Informe de Sensibilidad	67

RESUMEN

La optimización de procesos está orientada en ayudar a la empresa a rediseñar sus procesos de negocio con el objetivo de reducir costos y mejorar la eficiencia obteniendo así el mayor beneficio posible usando las herramientas de mejora adecuada, cuyo uso es fundamental para lograr resultados efectivos. Un proceso defectuoso genera sobrecostos y si es un proceso “Core” resta competitividad y eventualmente afecta la rentabilidad.

La hoja de cálculo EXCEL® (*Microsoft Corporation*) a través del complemento SOLVER permite resolver problemas de Optimización de procesos basados en el modelo matemático de programación lineal llamado SIMPLEX y es utilizado como herramienta para resolver los problemas de optimización del ciclo de carguío-acarreo en la Mina Lagunas Norte.

Los objetivos de esta tesis consisten en la aplicación de técnicas de programación lineal mediante SOLVER® con el fin de asegurar un óptimo desempeño del ciclo de carguío-acarreo del mineral lo cual significa un flujo más dinámico y productivo de mineral hacia los sistemas de chancado.

Nuestra hipótesis de optimizar el proceso del carguío-acarreo de mineral en la Mina Lagunas Norte aplicando el software SOLVER® se ha confirmado por los resultados obtenidos y las conclusiones más importantes son:

Se lograron obtener significativas mejoras y ahorros operativos del orden de \$18,533.00 en los procesos de carguío-acarreo de mineral de la mina Lagunas Norte, lo cual constituye 12,35 % del costo del proceso.

Se verificó el uso de SOLVER como una herramienta tecnológica y útil a la hora de modelar y optimizar procesos mineros. SOLVER forma parte de una serie de comandos a veces denominados herramientas de análisis que puede encontrar un valor óptimo (mínimo o máximo) para una fórmula en una celda, denominada la celda objetivo, sujeta a restricciones o limitaciones en los valores de otras celdas de fórmula en una hoja de cálculo.

PALABRAS CLAVE: Carguío-Acarreo, Modelo Matemático, Programación Lineal, SOLVER, Optimización,

ABSTRACT

Process optimization is aimed at helping the company to redesign its business processes with the aim of reducing costs and improving efficiency, thus obtaining the greatest possible benefit by using the appropriate improvement tools, the use of which is essential to achieve effective results. A defective process generates cost overruns and if it is a "Core" process, it loses competitiveness and eventually affects profitability.

The EXCEL® worksheet (Microsoft Corporation) through the SOLVER plug-in allows solving Process Optimization problems based on the mathematical model of linear programming called SIMPLEX and is used as a tool to solve problems of optimization of the loading-hauling cycle in The Lagunas Norte Mine.

The objectives of this thesis are the application of linear programming techniques through SOLVER® in order to assure optimum performance of the ore loading-hauling cycle which means a more dynamic and productive flow of ore towards the crushing systems.

Our hypothesis to optimize the process of the ore loading-hauling in the Lagunas Norte Mine applying the software SOLVER® has been confirmed by the results obtained and the most important conclusions are:

Significant improvements and operating savings of the order of \$18,533.00 were achieved in the ore loading-hauling processes of the Lagunas Norte mine, which means 12,35% of the whole operating costs.

The use of SOLVER was verified as a technological and useful tool when modeling and optimizing mining processes. SOLVER is part of a series of commands sometimes called analysis tools that can find an optimal (minimum or maximum) value for a formula in a cell, called the target cell, subject to restrictions or limitations on the values of other formula cells in a spreadsheet.

KEY WORDS: Load-Carry, Mathematical Model, Linear Programming, SOLVER, Optimization,

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

De acuerdo a tendencias globales las empresas mineras en todo el mundo han puesto en práctica importantes estrategias de reducción de costos y una mayor disciplina en la administración del capital ha reemplazado la inversión en proyectos, con empresas mineras que simplificaron sus portafolios, renegociaron sus deudas y clausuraron operaciones marginales. Ahora, están volcando su atención en obtener mayor productividad mediante un enfoque orientado hacia la *Excelencia Operativa y Optimización*. A la par en nuestro país las compañías mineras continúan enfrentando múltiples presiones, la ley de los minerales continúa decreciendo, los costos siguen elevándose, los conflictos sociales complican aún más el panorama; a la luz de estas realidades, la mejora incremental ya no resulta suficiente. El carguío y el transporte constituyen las acciones que definen la principal operación en una faena minera. Estos son responsables del movimiento del mineral o estéril que ha sido fragmentado en un proceso de voladura, éstos procesos productivos son los más influyentes en los costos de operación (45% al 65% del costo *mina*), por lo que es de gran importancia garantizar un ambiente de operación apto para lograr los mejores rendimientos de los equipos involucrados, tanto en la parte física (material, equipos, mantención, disponibilidad, insumos, etc.), como en la parte humana (operadores, mantenedores, jefes de turno, etc.). Con el uso de técnicas de Programación Lineal podemos desarrollar una estrategia de optimización de estos procesos críticos; la Programación Lineal no es un recurso nuevo, los beneficios del impacto de su aplicación a procesos de producción de diversa índole están bien documentados, la utilización de la capacidad de procesamiento del computador y el avance vertiginoso de nuevas tecnologías ofrecen un marco adecuado para su uso y manejo en entornos de producción de la industria minera, para tal fin utilizaremos la hoja de cálculo EXCEL® (*Microsoft Corporation*.) y el complemento SOLVER.

Mirando hacia el futuro, resulta cada vez más claro que la innovación y optimización pueden hacer mucho más que reducir la intensidad del capital. Con un enfoque estratégico, también tienen el poder de reducir la intensidad de energía y de mano de obra, incrementando al mismo tiempo la intensidad de la actividad minera.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el impacto de la Programación Lineal con el uso de Solver en la optimización de las operaciones de carguío-acarreo de mineral en la Mina Lagunas Norte, la Libertad?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

La programación lineal (PL) aplicada a los procesos industriales ha demostrado ser una herramienta muy potente y útil para optimizar y reducir costos, específicamente en el rubro minero, la presente investigación tiene por finalidad contribuir a su inclusión y análisis en los procesos de producción de las empresas mineras

1.3.2. Justificación práctica

El desarrollo de la presente investigación tiene por finalidad optimizar los recursos de la compañía minera mediante un manejo más eficiente y tecnológico de las operaciones de carguío y transporte de mineral.

1.3.3. Justificación valorativa

Las compañías mineras que han estado enfrentando por años situaciones desafiantes pueden obtener resultados diferentes al darle un nuevo enfoque a la gestión de operaciones, esto puede incluir la inversión en herramientas como la Programación Lineal que crean valor en las empresas y facilitan una mejor toma de decisiones.

1.3.4. Justificación académica

La finalidad del desarrollo de la presente tesis es la aplicación de conocimientos teóricos a la práctica para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

1.4. Limitaciones

El desarrollo de la presente tesis de optimización de carguío acarreo en la Mina Lagunas Norte corresponden a procesos específicos de Lagunas Norte, son aplicables al sistema de

explotación a tajo abierto y a procesos de carguío-acarreo mediante la operación de camiones gigantes, cargadores frontales y palas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar el Impacto de la programación lineal con el uso de solver en la optimización de las operaciones de carguío- acarreo de mineral en la mina lagunas norte, la libertad, 2017.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar el impacto de la decisión que se toma a través del programa solver en el desempeño de las palas hidráulicas y cargadores frontales.
- Conocer cuál es la influencia de la decisión que se toma a través del programa solver en el tiempo de carguío.
- Determinar cuál es el impacto de las restricciones identificadas por el solver en el desempeño de los camiones komatsu.
- Conocer el impacto de las restricciones identificadas por el solver en el tiempo de acarreo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Abdel (2010) y Dimitrakopoulos (2007) según su tesis afirman que en las actuales explotaciones de recursos minerales el diseño y planeamiento minero se lleva a cabo utilizando técnicas determinísticas que conllevan a procesos mineros en los cuales se dejan de explotar o producir una cantidad considerable de recursos minerales, que traen como consecuencia niveles de producción inadecuados desde el punto de vista tecnológico; financiero; social y ambiental. Es por esto que un adecuado diseño y planeamiento minero utilizando herramientas de optimización logrará en el corto, y largo plazo incrementar la productividad y competitividad de dichas explotaciones, que redundará en una explotación sostenible (en términos técnicos, económicos, sociales y ambientales) y en la generación de nuevos empleos en las regiones donde se lleven a cabo estos procesos productivos.

Hustrulid (2006) en su análisis de su tesis confirma que, la planeación minera tiene como finalidad la obtención de la mejor proyección del uso de los recursos minerales disponibles, y además que es una actividad capaz de ajustarse a eventuales cambios en el transcurrir del tiempo; se puede afirmar que la planeación minera es la gestora del presente y futuro de la actividad minera. Dicha actividad minera posee un componente operacional llamado Planeación de Producción; El éxito de esta planeación dependerá de poder alcanzar un Valor Presente Neto (VPN) óptimo que genere factibilidad al proyecto a desarrollar. Llegar a dicho valor lleva a que la actividad sea a veces difícil y compleja.

Arias (2008) según su tesis sostiene que, con el fin de obtener los resultados esperados en el planeamiento minero, se tienen dos métodos de seguimiento del buen desempeño. El primer método son las técnicas de simulación con la cual basados en datos conocidos se generan una cierta cantidad de hipótesis a las que se les realiza un análisis y se empiezan a trabajar. La importancia del uso de las técnicas de simulación en minería está enmarcada por el hecho de que se puede lograr una reducción de costos y de tiempo en algunas actividades, la disminución de riesgos a la hora de la toma de decisiones y la posibilidad de elaborar un modelo de simulación que pueda aproximarse a la realidad. Y el segundo método, es la *Optimización* que tiene como base un plan ya estipulado o basarse en las simulaciones ya realizadas. Su objetivo principal es realizar las mejoras que sean pertinentes para no equivocarse el camino de los objetivos planteados. En la actualidad, la optimización de la planeación, las aproximaciones utilizadas para estimación de reservas y cálculo de la producción mineral resultan imprecisas.

Según Hustrulid (2006) en su tesis afirma que es válido tener en cuenta que esta incertidumbre ha disminuido con la definición y el establecimiento de normas internacionales para la estimación de recursos mineros, como es el caso de la norma The JORC CODE.

Morales (2010) según su tesis declara que la planeación minera tradicional estima los cuerpos minerales por medio de modelos simples, los cuales no permiten observar la variabilidad e incertidumbre asociada a este. Por lo anterior, conseguir una mejor aproximación en cuanto a las reservas de un depósito, producción de mineral y mejoramiento de la planeación contribuirá con el objetivo principal de todo proyecto minero que será alcanzar el mayor VPN posible.

Askari-Nasab (2010) profesor del *Mining Optimization Laboratory* de la Universidad de Alberta, Canadá explica que dentro de los procesos de diseño y planeamiento minero de las explotaciones a cielo abierto se evidencia la necesidad de utilizar herramientas para la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre que permitan realizar dichos procesos con técnicas tales como Programación Lineal, Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, entre otros.

King (2009), Xu, (2009) y después Dimitrakopoulos (2010) según sus tesis afirman que la metodología para desarrollar este trabajo se establece teniendo en cuenta que el proceso de planeación en minería es básicamente un Problema de Optimización, que puede ser resuelto mediante: Programación lineal; Programación entera o Programación estocástica.

Programación Lineal: Un problema de programación lineal es un problema de optimización en donde todos los parámetros son exactamente conocidos y determinísticos y las relaciones entre variables en la función objetivo y las restricciones son lineales. El método comúnmente utilizado para resolver estos problemas es el SIMPLEX.

Programación Entera: Son problemas en los cuales algunas o todas las variables deben ser enteras. Existen varios métodos de solución de problemas utilizando programación entera, estos son: Branch and Bound; Cutting Planes; Branch and Cut y Meta heurísticos.

Programación Estocástica: Es una técnica de optimización usada cuando los problemas envuelven incertidumbre (la incertidumbre asociada a lo geológico; el mercado y los precios). Dicha incertidumbre puede representarse por medio de distribuciones de probabilidad o a través de posibles escenarios.

Obregón Quispe. (2016) en su Tesis "Optimización del blending con aplicaciones de Programación Lineal para el incremento del valor económico del mineral en la Unidad Minera Catalina Huanca S.A.C." afirma en su estudio que la Optimización de Blending de los diferentes tajos de la Unidad Minera Catalina Huanca SAC, nos lleva a obtener el mayor rendimiento metalúrgico y beneficio económico, utilizando herramientas estadísticas y de

programación lineal (*Solver*), que nos ayudan a obtener las mezclas adecuadas para la generación del mismo.

Con el fin de maximizar los beneficios esperados y minimizar los riesgos asociados, para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizarán elementos de programación lineal (PL).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Programación Lineal

El objetivo de un modelo matemático es reproducir la realidad de la forma más fiel posible a fin de entender cómo se comporta y poder obtener respuestas a determinadas acciones. La programación lineal es un tipo de modelo matemático que se desarrolló a partir de la Segunda Guerra Mundial para resolver cierto tipo de problemas de asignación de recursos entre distintas actividades. Después de la guerra las aplicaciones de la programación lineal se extendieron a una amplia variedad de problemas, de manera que hoy se utiliza en campos como la ingeniería, la economía, la gestión, y muchas otras áreas de la ciencia, la técnica y la industria. La programación lineal fue formulada por George B. Dantzig alrededor de 1947, cuando trabajaba como consejero matemático para la Fuerza Aérea de Estados Unidos en el desarrollo de un sistema automático de planificación temporal de despliegue, entrenamiento y abastecimiento logístico. Debido a que la Fuerza Aérea denomina programas a sus diversos planes y proyectos a implementar, en el primer artículo publicado por Dantzig se refiere a este problema como programación en una estructura lineal. El término programación lineal fue acuñado por el economista y matemático T.C. Koopmans en el verano de 1948 cuando colaboraba con el propio Dantzig. En 1949, Dantzig publicó el método del SIMPLEX para resolver programas lineales, método que fue ampliamente aceptado por su capacidad de producir soluciones en un tiempo razonable. La programación lineal estudia la optimización (minimización o maximización) de una función lineal que satisface un conjunto de restricciones lineales de igualdad y/o desigualdad. (J.J. Ruiz, 2015).

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir el problema. El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales. En este caso, la palabra programación no se refiere aquí a términos computacionales; en esencia es sinónimo de planeación. Por lo tanto, la programación lineal involucra la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo; esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada —de acuerdo con el modelo matemático— entre todas las alternativas factibles. (Taha, 2012).

La programación lineal es una técnica matemática para encontrar los mejores usos de una empresa de los limitados recursos de la organización (Agbadudu, 1996). Problemas de programación lineal son los concernientes con el uso eficiente o asignación de recursos escasos para satisfacer los objetivos deseados.

La palabra *lineal* significa que las relaciones son los representados por líneas rectas, mientras *Programación* significa tomar decisiones de manera sistemática. Por lo tanto, la programación lineal puede ser descrita como una técnica de toma de decisiones bajo determinadas limitaciones en el supuesto de que las relaciones entre las variables que representan diferentes fenómenos resultan ser lineales. (Anyebe, 2001).

De acuerdo con Agbadudu (1996) en su tesis el objetivo de la programación lineal es buscar valores de algunas variables controlables con el fin de determinar el método más eficiente de la asignación de estos recursos a las actividades de manera que se optimiza una medida del rendimiento.

Diferentes autores (Agbadudu, 1996; Anyebe, 2001; Gupta y Hira, 2011; Verma, 2010) han identificado algunos supuestos básicos sobre los que se basa el modelo de programación lineal, éstas incluyen:

- i. *Aditividad*: Se refiere al valor de la función objetivo para los valores dados de las variables de decisión y la suma total de recursos utilizados debe ser igual a la suma de contribución (beneficio o coste) ganados de cada variable de decisión y la suma de los recursos utilizados por cada uno de las variables de decisión, respectivamente;

- ii. *Divisibilidad*: Significa que el valor de una variable controlable puede ser fracción, no necesariamente un número entero;
- iii. *Determinista*: Significa que se conozcan todos los coeficientes del modelo, y por lo tanto sea constante en el período considerado;
- iv. *Proporcionalidad*: Significa que la función objetivo y las restricciones deben ser lineales;
- v. *Certeza*: Los distintos parámetros, a saber, los coeficientes de la función objetivo, los coeficientes de las restricciones y los valores de los recursos en las limitaciones son sin duda precisamente conocidos y sus valores no cambian con el tiempo;
- vi. *Opciones finitas*: Significa que un número limitado de opciones están disponibles para el tomador de decisiones y que las variables de decisión están interrelacionadas y son no negativas.

La programación lineal es una de las técnicas más ampliamente aplicada en operaciones, la investigación en los negocios y la industria, aplicaciones industriales de programación lineal incluyen la solución de problemas de mezcla de productos, la producción, problemas de agenda, los problemas de pérdida de equipamiento, el equilibrio de la línea de montaje y de fabricación propia o compra (subcontratación) entre otros problemas. La programación lineal como una investigación de operaciones técnica se puede aplicar en la solución de problemas relacionados con la gestión. Algunas de las aplicaciones de programación lineal para resolver problemas de gestión incluyen los problemas de selección de medios, problemas de selección de cartera, los problemas de planificación de beneficios, problemas de transporte, problemas de asignación y problemas de programación de mano de obra (Gupta y Hira, 2011).

Entonces del conjunto de definiciones dadas podemos inferir que la programación lineal se puede definir como:

"Un método matemático para asignar recursos escasos a las actividades que le competen de una manera óptima cuando el problema se puede expresar utilizando una función lineal objetivo y las restricciones de desigualdad lineales. "

Un programa lineal consta de un conjunto de variables, una función objetivo lineal que indica la contribución de cada variable al resultado deseado, y un conjunto de restricciones lineales que describe los límites de los valores de las variables. La "respuesta" a un programa lineal es un conjunto de valores para las variables del problema que se traduce en la mejor - grande o más pequeño - el valor de la función objetivo y, sin embargo, es consistente con todas las restricciones. Formulación es el proceso de la traducción de un problema del mundo real en un programa lineal. Una vez que un problema se ha formulado como un programa lineal, un software puede ser usado para resolverlo.

2.2.2. Formulación de un modelo de Programación Lineal

En el proceso de formulación de un modelo de programación lineal hay que dar los siguientes pasos:

1. Determinación de las variables de decisión.

Representan los elementos del sistema a modelar que son controlables por el decisor. En los modelos lineales continuos estas variables toman como valores números reales y se representan por letras con subíndices como se acostumbra a hacer con las variables matemáticas, o literales alusivos a su significado: peso, valor, etc. En el primer caso también se utiliza la representación como vector de un conjunto indexado de variable:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$$

2. Determinación de las restricciones.

Representan las limitaciones prácticas de determinados recursos o imposiciones físicas de la realidad. Se expresan como ecuaciones e inecuaciones lineales de las variables de decisión. Matemáticamente adoptan una de las siguientes formas:

$$g_i(\mathbf{x}) \geq b_i; \quad g_i(\mathbf{x}) \leq b_i; \quad g_i(\mathbf{x}) = b_i$$

$$i = 1, \dots, m; \text{ con } g_i \text{ una función lineal en } x$$

3. Formulación de la función objetivo.

Se trata de la función que mide la calidad de la solución y que hay que optimizar (maximizar un beneficio o minimizar un coste). También es una función lineal de todas o parte de las variables de decisión.

$$\text{Maximizar } z = f(x); \quad \text{Minimizar } z = f(x)$$

2.2.3. Problema General de Programación Lineal

Para un caso de maximización según Verma (2010) es:

$$\text{Maximizar } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$$

(Función objetivo)

$$\text{Sujeto a } a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_n$$

(Restricciones explícitas)

$$y \quad X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$$

(Restricciones de no-negatividad)

Donde:

Z=El valor de la medida global del rendimiento.

X_n =Niveles de actividad (1, 2...n); X_1, X_2, \dots, X_n son variables de decisión.

$a_{i,j}$ =Cantidad de recursos i consumidos por cada unidad de actividad j .

b_i =Cantidad de recursos que son disponibles para la asignación de actividades ($j=1, 2 \dots m$).

2.2.4. Descripción de SOLVER

2.2.4.1. Cargar el Complemento SOLVER

El complemento SOLVER es un programa de complemento de Microsoft Office Excel que está disponible cuando se instala Microsoft Office o Excel, para usar el complemento Solver, sin embargo, primero debe cargarlo en Excel.

1. En Excel Professional Plus 2016 Ir archivo > opciones
2. Haga clic en Complementos y, en el cuadro Administrar, seleccione Complementos de Excel.
3. Haga clic en Ir.
4. En el cuadro Complementos disponibles, active la casilla Solver y, a continuación, haga clic en Aceptar.
 - a. Sugerencia Si el complemento Solver no aparece en el cuadro Complementos disponibles, haga clic en Examinar para buscar el complemento.
 - b. Si se le indica que el complemento Solver no está actualmente instalado en su equipo, haga clic en Sí para instalarlo.
5. Una vez cargado el complemento Solver, el comando Solver está disponible en el grupo análisis de la ficha datos.

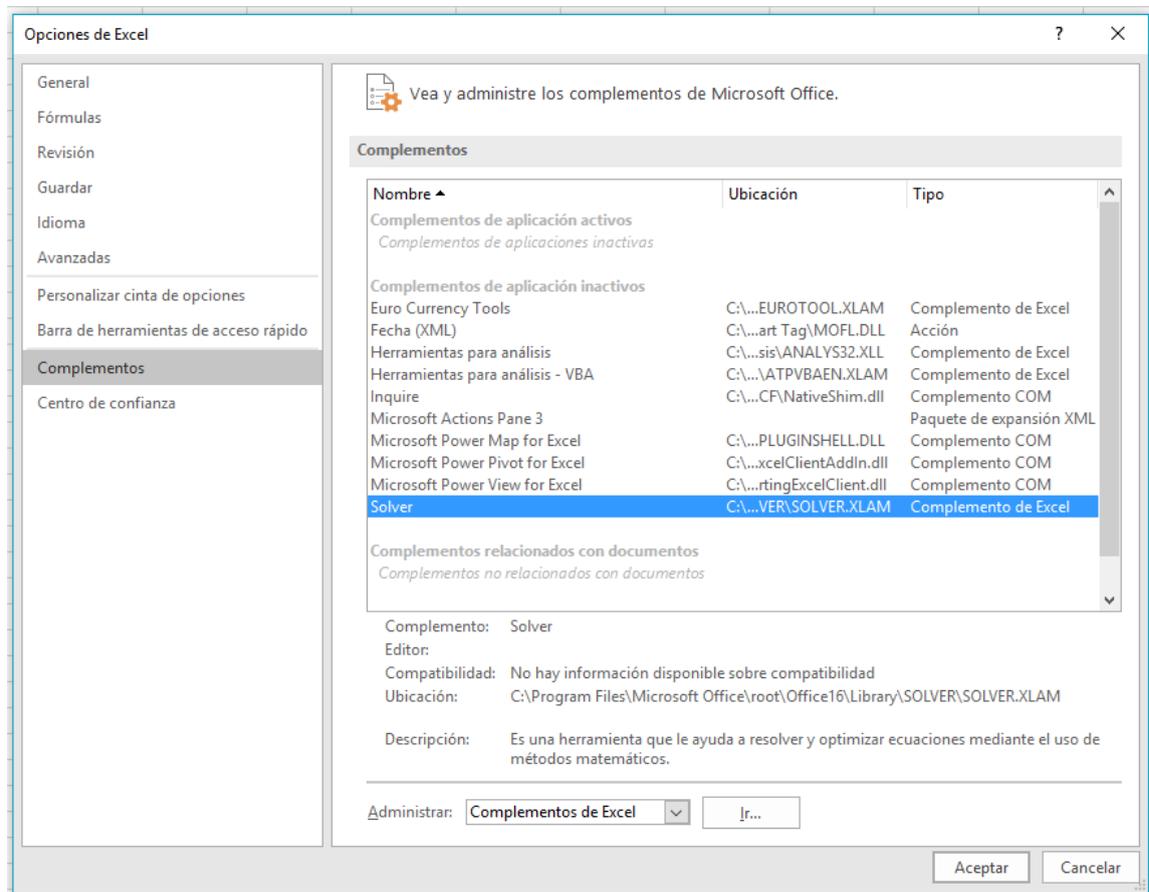


Figura N° 1. Configuración de Solver

Fuente: Software Excel Solver v 16.0

2.2.4.2. Optimización con SOLVER

La introducción de un modelo de optimización, un programa lineal en nuestro ejemplo, se puede sintetizar en cuatro fases:

1. Organizar los datos del modelo en la hoja de trabajo.

Si bien son múltiples las posibles formas de diseñar el formato y colocación de los datos de entrada, es recomendable seguir los mismos principios que en toda aplicación con hoja de cálculo: pensar en la hoja como un informe que explique el problema, identificar los datos introducidos, colocar comentarios, introducir todos los datos iniciales del problema y construir a partir de los mismos el modelo de optimización con el objeto de facilitar el análisis de sensibilidad, utilizar técnicas de diseño para presentar el modelo, etc. Por otra parte, interesa organizar el programa según el formato del gráfico I con el objeto de ilustrar la propia estructura del modelo.

2. *Reservar una celda para cada variable de decisión.*

Siguiendo el esquema de un programa matemático, es recomendable que inicien la hoja de trabajo. Deberán estar vacías o con datos numéricos, nunca fórmulas, y a ser posible con notas o comentarios.

3. *Crear una celda para la función objetivo próxima a las que recogen las variables.*

La fórmula que incorpora deberá crearse a partir de las celdas descritas en el punto anterior.

4. *Para cada restricción, crear una celda que recoja la fórmula de su parte izquierda, y a la derecha de dicha celda colocar el término independiente.*

Para ejemplificar respecto al uso de SOLVER utilizaremos el siguiente modelo de Programación Lineal:

Maximizar u Optimizar $200X+150Y+120Z$

Sujeto a: $15X + 7.5Y + 5Z \leq 315$

$2X + 3Y + 2Z \leq 110$

$X + Y + Z \leq 50$

$X, Y, Z \geq 0$

Paso 1: Abrir una planilla de cálculo de Excel y definir las variables de decisión y la función objetivo. En este ejemplo se han marcado con amarillo y verde las variables de decisión y función objetivo respectivamente sólo para facilitar la comprensión. Es importante notar que la función objetivo (celda F4) será siempre una fórmula que depende de los parámetros de la función objetivo (celdas B5, C5, D5) y las variables de decisión (B4, C4, D4).

F4		fx =SUMAPRODUCTO(B4:D4;B5:D5)				
	A	B	C	D	E	F
1						
2		VARIABLES DE DECISIÓN				
3		X	Y	Z		F.OBJETIVO
4						0
5		200	150	120		

Figura N° 2. Variables de decisión y Función Objetivo

Fuente: Software Excel Solver v.16.0

Paso 2: Se definen las restricciones del modelo. La columna en amarillo bajo el título "Lado Izq" es una fórmula de los parámetros y las variables de decisión en las respectivas restricciones. Por ejemplo, la fórmula incorporada en E9 es simplemente: $15X + 7,5Y + 5Z$. La celda F9 es el lado derecho de dicha restricción y corresponde a una constante (315).

E9		fx =SUMAPRODUCTO(\$B\$4:\$D\$4;B9:D9)				
	A	B	C	D	E	F
1						
2		VARIABLES DE DECISIÓN				
3		X	Y	Z		F.OBJETIVO
4						0
5		200	150	120		
6						
7		RESTRICCIONES				
8		X	Y	Z	LADO IZQ	LADO DER
9		15	7,5	5	0	315
10		2	3	2	0	110
11		1	1	1	0	50

Figura N° 3. Restricciones del modelo

Fuente: Software Excel Solver v 16.0

Paso 3: Ingresamos a la Opción "Solver" luego definimos la celda objetivo (función objetivo), el valor que buscamos (máximización o minimización), las celdas que deseamos cambiar (variables de decisión) y las restricciones. Para nuestro ejemplo está será la pantalla que se debe obtener:

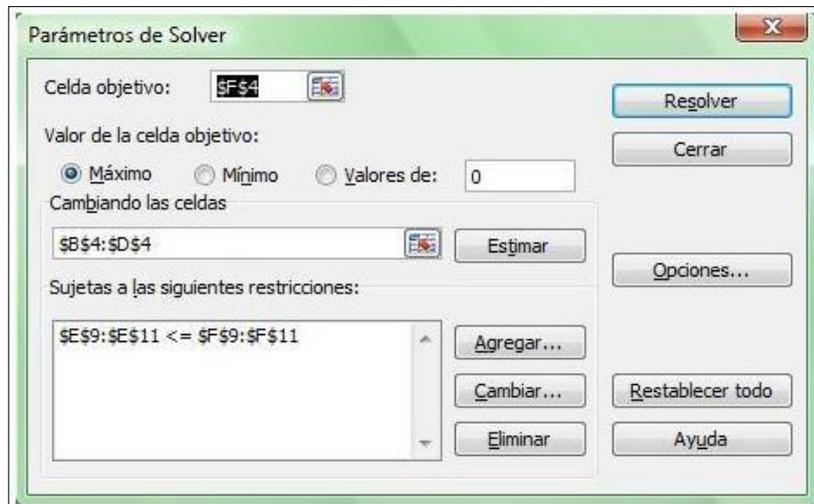


Figura N° 4. Parámetros de Solver

Fuente: Software Excel Solver v 16.0

Paso 4: Accedemos a "Opciones..." y seleccionamos "Adoptar modelo lineal" y "Adoptar no negativos". Finalmente seleccionamos "Aceptar" y luego "Resolver".

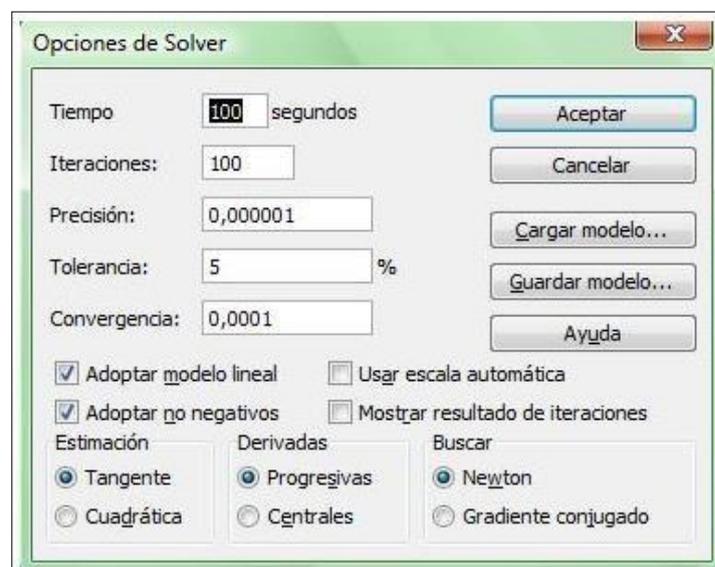


Figura N° 5. Opciones de Solver

Fuente: Software Excel Solver v 16.0

Paso 5: Si el proceso se ha desarrollado en forma correcta la planilla de cálculo se actualizará y se obtendrán los siguientes resultados. Solución Óptima: $X=4$, $Y=10$, $Z=36$. Valor Óptimo: $V(P)=6,620$. Se recomienda requerir el informe de sensibilidad tal como se muestra en la imagen de abajo.

VARIABLES DE DECISIÓN				
X	Y	Z	F.OBJETIVO	
4	10	36	6620	
200	150	120		
RESTRICCIONES				
X	Y	Z	LADO IZQ	LADO DER
15	7,5	5	315	315
2	3	2	110	110
1	1	1	50	50

Resultados de Solver

Solver ha hallado una solución. Se han satisfecho todas las restricciones y condiciones.

Utilizar solución de Solver
 Restaurar valores originales

Informes
 Respuestas
Sensibilidad
 Límites

Figura N° 6. Resultados de Solver

Fuente: Software Excel Solver v 16.0

2.3. Definición de términos básicos

Algoritmo

Un algoritmo proporciona reglas fijas de cálculo que se aplican en forma repetitiva al problema, y cada repetición (llamada iteración) acerca la solución a lo óptimo. Como los cálculos asociados con cada iteración suelen ser tediosos y voluminosos, es recomendable que estos algoritmos se ejecuten con la computadora. (Taha, H. 2011).

Algoritmo SIMPLEX

Procedimiento general para resolver problemas de programación lineal. Desarrollado por George Dantzig en 1947, se ha comprobado su extraordinaria eficiencia, y se usa en forma rutinaria para resolver problemas grandes en las computadoras de hoy en día. Excepto en el caso de problemas muy pequeños, se ejecuta siempre en una computadora y existe una amplia variedad de paquetes complejos de software para ello. (Hillier and Lieberman, 2010).

Costo del Proceso de Carguío-Acarreo (Z)

Costo del Proceso luego de haber aplicado Programación Lineal y Optimización con SOLVER.

Costo Operativo por ciclo (Ci)

Costos asumidos por cada ciclo iterativo de trabajo en la operación minera.

Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones es tanto un arte como una ciencia; el arte de describir y modelar el problema, y la ciencia de resolver el modelo utilizando algoritmos matemáticos precisos. (Taha, H. 2011).

Mineral

Un mineral es un elemento o compuesto químico que es normalmente cristalino y que se ha formado como resultado de procesos geológicos. (Infomine, 2016).

Modelo Matemático

Los modelos matemáticos también son representaciones idealizadas, pero están expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas. Las leyes de la física como $F=ma$ y $E=mc^2$ son ejemplos familiares. En forma parecida, el modelo matemático de un problema industrial está conformado por el sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema. (Hillier and Lieberman, 2010)

Número de Ciclos (X_i)

Ciclos efectivos de operación realizados por el camión minero.

Operaciones de Carguío-Acarreo

Operaciones que se llevan a cabo con el fin de retirar el material volado del frente y transportarlo adecuadamente a su lugar de destino; la cual tiene la siguiente secuencia:

- a) Preparación de la zona de trabajo.
- b) Posicionamiento de equipos.
- c) Retirar el material volado desde el frente de trabajo.
- d) Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto para el traslado.
- e) Transporte del material a su lugar de destino (planta, acopio, botaderos, etc.).
- f) Descarga del material.
- g) Retorno del equipo de transporte al punto de carguío.

Ésta secuencia es cumplida hasta que haya sido retirado el material requerido del frente.
(Estrella, César 2016)

Optimización

Optimización es el arte y la ciencia de determinar la óptima colocación de recursos escasos y que conlleven al mejor efecto posible. Las técnicas de optimización se ponen en juego todos los días en las cuestiones de planificación, asignación de recursos, programación, toma de decisiones industriales, etc. (Chinneck, J. 2000).

Parámetro

Variable cuyo valor no está determinado por la persona a cargo de tomar las decisiones, sino que se establece en forma exógena. (Eppen, G. 2000).

Programación Lineal

Modelo determinístico formado por ecuaciones lineales, y que contiene una sola medida de desempeño (función objetivo) por optimizar, sujeta a satisfacer un conjunto dado de restricciones. (Eppen, G. 2000).

Solver®

Solver es un programa complementario de Microsoft Excel que se utiliza para resolver problemas de Optimización. Se usa para encontrar un valor óptimo (máximo o mínimo) para una fórmula en una celda - llamada célula objetivo - sujeta a restricciones o límites, sobre los valores de otras celdas de fórmula de una hoja de cálculo. (*Microsoft Corporation*® 2017).

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

El impacto de la Programación Lineal con el uso de Solver será positivo porque se optimizarán los costos en el proceso de las operaciones específicas de carguío-acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, la Libertad.

3.2. Operacionalización de variables

3.2.1. Variable Independiente

- Programación Lineal con el uso de Solver

3.2.2. Variables Independientes

- Optimización de Operaciones
-

Tabla N° 1. Operacionalización de Variables Independiente

Variable Independiente	Definición	Dimensión	Indicadores
Programación lineal con el uso de solver	Es una técnica de maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables, donde su función objetivo y restricciones son expresadas por inecuaciones y/o ecuaciones lineales	<ul style="list-style-type: none"> - Decisión que se toma a través del solver. - Restricciones del solver 	<ul style="list-style-type: none"> • $X=(X_1, X_2, \dots, X_4)$ • $g_i(x) \leq b$ • $g_i(x) \geq b$ • $g_i(x) = b$

Tabla N° 2. Operacionalización de Variables Dependiente

Variable Dependiente	Definición	Dimensión	Indicadores
Optimización De las operaciones	Consiste en optimizar el empleo de recursos limitados con el fin de reducir costos y tiempo, aumentando así el rendimiento y la productividad de una operación	- Carguío - Acarreo	<ul style="list-style-type: none"> • (minutos/ciclo) • (dólares americanos por ciclo)

CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Tipo de diseño de investigación.

Experimental con diseño exploratorio.

4.2. Material.

4.2.1. Unidad de estudio.

Reporte mensual de equipos de carguío - acarreo (cargadores frontales, palas y camiones) utilizados en la Mina Lagunas Norte, la Libertad.

4.2.2. Población.

Reportes de la cantidad de equipos (09 equipos) de carguío-acarreo utilizados en la mina Lagunas Norte la Libertad.

4.2.3. Muestra.

Se va a trabajar con 03 equipos (Cargador frontal, Pala y Camión) de carguío-acarreo en el nivel 4160 de la mina Lagunas Norte la Libertad.

4.2.4. Técnicas de recolección y análisis de datos

Las técnicas usadas en la presente investigación son la recolección de información en el Internet, libros de Investigación de Operaciones, Análisis de Reportes Técnicos etc.

4.2.4.1. Instrumentos

- Reportes Técnicos Independientes realizados al proyecto Lagunas Norte
- Memorias Anuales de Barrick Gold Corporation y otros.
- Revistas especializadas de la industria.
- Páginas web de Optimización y Programación Lineal.
- Página web de Barrick Gold Corporation.
- Uso del software EXCEL SOLVER® para la optimización del proceso

La data recolectada se ordena, analiza y procesa a través de las herramientas informáticas de procesamiento de textos y hojas de cálculo Word® y Excel® respectivamente.

4.2.4.2. Procedimientos

Hacemos uso de la metodología de la Investigación de Operaciones:

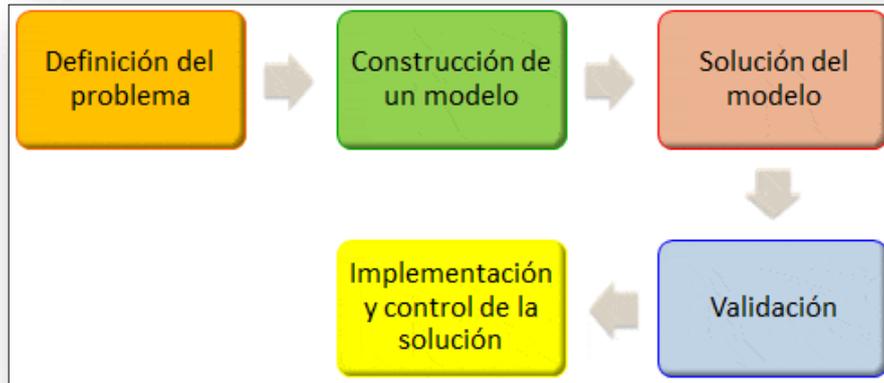


Figura N° 7. Metodología de la Investigación de Operaciones

Fuente: www.gestiondeoperaciones.net

CAPÍTULO 5. DESARROLLO

5.1. Ubicación

Minera Barrick Misquichilca S.A. (MBM) UEA Lagunas Norte se ubica en un área aproximada de 185 Km² del Alto Chicama, Distrito de Quiruvilca, Provincia de Santiago de Chuco, Departamento de La Libertad en la parte Central Norte del Perú aproximadamente a 90 km al este de la ciudad de Trujillo y a 11 km. al noreste del pueblo de Quiruvilca. La mina está localizada a 7°57' Latitud Sur y 78°15' W Longitud Oeste y se sitúa en la Cordillera Occidental de los Andes Peruanos a una altitud aproximada de 4000 m.s.n.m. a 4260 m.s.n.m.



Figura N° 8. Mapa de Ubicación de Lagunas Norte

Fuente: Google Images

5.2. Fisiografía

El área de la mina está dominada por colinas y montañas escarpadas, con valles escarpados. La zona es fuente de pastos naturales y pequeños arbustos. Afloramientos de roca y suelos poco profundos predominan en los valles. La mina está ubicada en una zona de alta actividad sísmica.

5.3. Geología

5.3.1. Geología Regional:

La Geología Regional de Lagunas Norte está dominada por gruesas secuencias de rocas sedimentarias *silicoclásticas* marinas del Mesozoico Medio a superior; infrayaciendo discordantemente a las secuencias volcánicas *dacíticas* y *andesíticas* del Grupo Calipuy, cortadas además por numerosos cuerpos intrusivos terciarios. La Secuencia Mesozoica ha sido afectada por lo menos por dos etapas de deformación compresiva durante la Orogenia Andina.

Las rocas volcánicas del Grupo Calipuy sobrepasan de manera discordante las Rocas mesozoicas. Hay cuatro etapas reconocidas de vulcanismo en el área:

1. Vulcanismo del arco de la isla en el Jurásico inferior.
2. El vulcanismo del arco de la isla en el Cretáceo Inferior.
3. Plutonismo en el Cretáceo Superior y el Terciario Inferior.
4. Vulcanismo continental e intrusiones asociadas en el Terciario.

El arco de la isla Jurásica se desarrolló a 100 km al oeste de la costa actual de Perú. Durante este tiempo, una cuenca marina se desarrolló entre el arco magmático y la Zona cratónica emergente al este. La Formación Chicama, que consiste en lutitas y lutitas bituminosas y arenitas, fue depositada en la cuenca durante este período. Esta formación alberga depósitos de carbón que se han explotado desde principios de 1900. El vulcanismo del arco de la isla continuó durante el Cretáceo Inferior con la migración del arco hacia el este. El vulcanismo activo dio lugar a la deposición de una secuencia gruesa de rocas volcánicas y volcánicas. En la región del Alto Chicama, el Cretáceo Inferior se caracteriza por la deposición de sedimentos clásticos del Chimú (cuarzo areniscas intercaladas con lodo) y formaciones de Carhuaz (areniscas sucias intercaladas con lutitas).

La mina Lagunas Norte se encuentra en la propiedad Alto Chicama, que se encuentra aproximadamente a mitad de camino entre la Mina de oro Pierina al sur y mina de oro Yanacocha al norte.

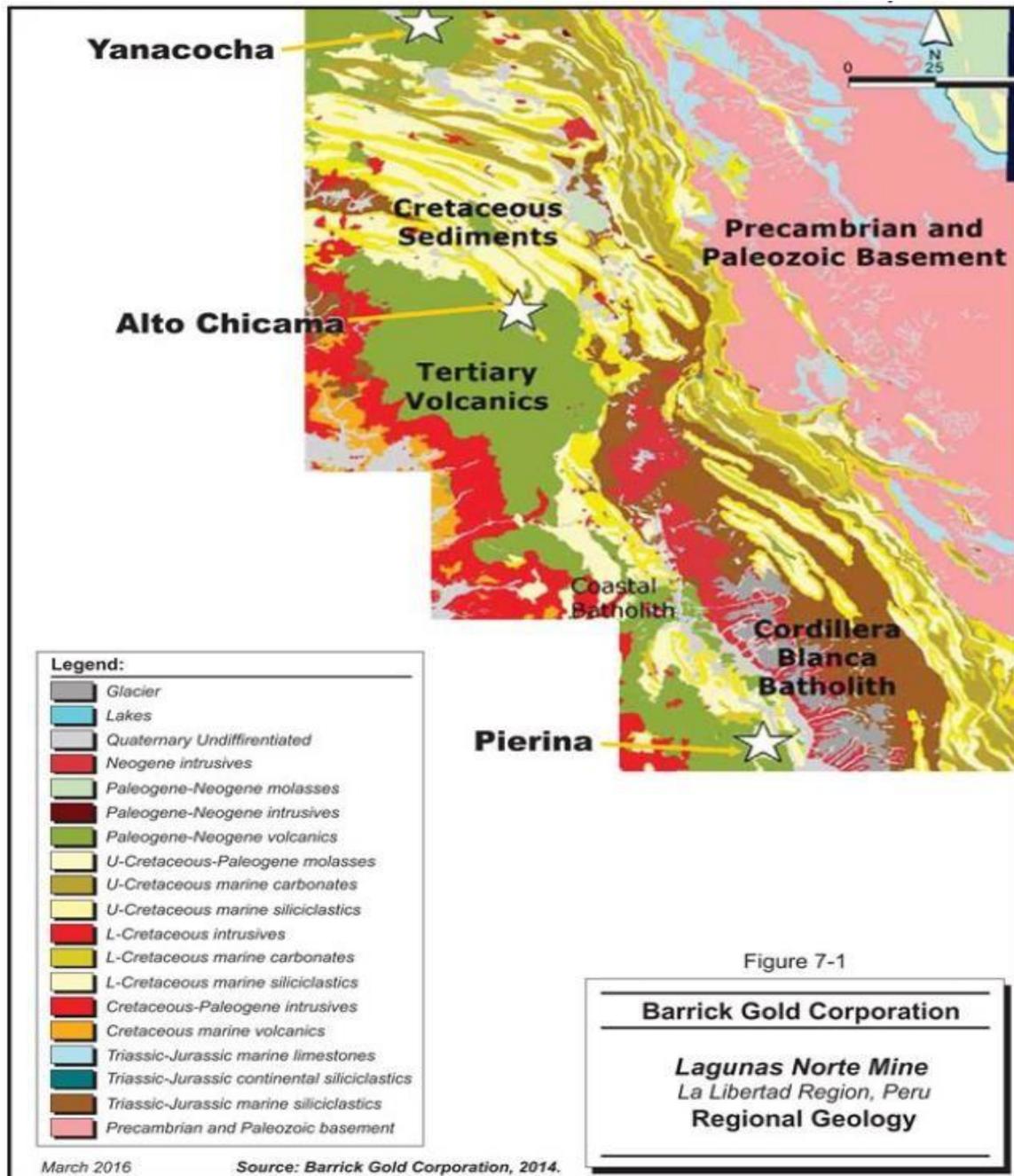


Figura N° 9. Geología Regional Lagunas Norte

Fuente: Barrick Gold Corporation –Lagunas Norte Technical Report. NI 43-101

5.3.2. Geología Local y Mineralización

La mineralización de Lagunas Norte es del tipo *epitermal* de *alta sulfuración*, se encuentra diseminada y hospedada en tufos y brechas volcánicas y sedimentarias. La mineralización aflora en la superficie y ha sido definida sobre un área de 1600 m de largo por 750 metros y hasta 300 metros de profundidad.

El 85% corresponde a óxidos y el 15% restante son sulfuros. Cerca del 80% de las reservas están contenidas en los sedimentos Chimú y el 20% restante corresponde a las rocas volcánicas del Grupo Calipuy.

El depósito consiste en un yacimiento de mineral de plata y oro, muy diseminado y de baja ley, que se encuentra intercalado con lechos de carbón y *lutitas carbonáceas*, así como areniscas, esquistos de barro y litologías volcánicas que contienen material sulfuroso con contenido de oro. Aunque parte del carbón y de los esquistos de barro carbonáceos contienen oro, su extracción no es práctica debido a factores técnicos y económicos; por lo tanto, este material se almacena en forma separada para su uso potencial en el futuro.

5.3.3. Estratigrafía

Jurásico

Formación Chicama

La Formación Chicama comprende lodo arcilloso interminado, lodo bituminoso, limolita y arenisca menor con intercalaciones locales de arcilla y material tufáceo reelaborado. Estos sedimentos terrígenos fueron depositados en una cuenca poco profunda, en el interior del mar, flanqueada al este por el continente emergido y al oeste por un arco volcánico. Los sedimentos erosionados del lado continental son principalmente arenas de cuarzo, mientras que los sedimentos derivados del arco volcánico son típicamente material rico en arcilla y tufaico. La naturaleza poco profunda y limitada de esta cuenca dio como resultado el desarrollo de un entorno reductor, que favoreció la formación de depósitos orgánicos. Estos depósitos orgánicos están presentes como material bituminoso y antracita o como lechos de carbón.

Cretáceo

Cretáceo Inferior

El Cretáceo Inferior se caracteriza por la sedimentación clástica en un entorno de mar abierto altamente oxigenado. Al este, el continente se vio afectado por el continuo levantamiento concurrente con hundimiento de la cuenca. Estas condiciones dieron como resultado una acumulación significativa de sedimentos detríticos. Además, durante este período, la isla se dirige al oeste de la cuenca sedimentaria y se sometió a erosión intensa debido a una reducción en la actividad magmática. Esto dio como resultado la formación de un compuesto altamente oxigenado

opuesto al entorno marino en lugar de las condiciones reductoras creadas por el mar interior durante el Jurásico.

Formación Chimú

Las rocas de la Formación Chimú se componen casi exclusivamente de arena de cuarzo muy limpia. Esta formación se caracteriza por un segundo orden hacia arriba en secuencia que comienza con la deposición de arenas gruesas y angulares seguidas de capas de adelgazamiento de arena fina que terminan en material de tamaño arcilloso.

Estas rocas se han transformado regionalmente en cuarcita gris-blanca altamente resistente. Secuencias de carbón y lodo fueron depositados en entornos deltaicos asociados. La Formación Chimú es la principal roca hospedante en el depósito de Lagunas Norte.

Formación Santa Carhuaz

La Formación Santa Carhuaz sobrepasa el Chimú y registra la deposición de sedimentos durante un período tectónico relativamente pasivo. La Formación Carhuaz consiste en piedra arenisca gris con un tono rojo y púrpura intercalado con lodo gris. Los lechos de cuarcita blanca están intercalados con arenisca y lodo en la parte superior de esta secuencia.

Formación Farrat

La Formación Farrat consiste en lechos de arenisca gruesa y blanca que comúnmente muestran estratificación cruzada plana y desarrollan localmente conglomerados de guijarros.

La Formación Farrat es similar a la Formación Chimú, sin embargo, la Formación Farrat carece de los lechos de carbón y el color gris que se observa en este último. Durante el Cretáceo Superior y parte del Terciario Inferior, el tectonismo extensional facilitó el emplazamiento de plutones a lo largo de la costa, culminando en el emplazamiento del *Batholith* costero al oeste del área de la mina.

Terciario Mioceno

Grupo Calipuy

Durante el Terciario, el arco magmático emigró más al este iniciando la aparición del vulcanismo continental y el desarrollo de pequeños arcos volcánicos orientados en una dirección sur-suroeste / norte-noreste. Este evento resultó en la alineación actual de las estructuras volcánicas del Calipuy en el área suroeste de Huamachuco, al este del área de depósito. Las rocas del Grupo Calipuy

son de composición calcoalcalina y predominan la andesita y riolita. Las estructuras volcánicas son predominantemente cúpulas o complejos de cúpulas.

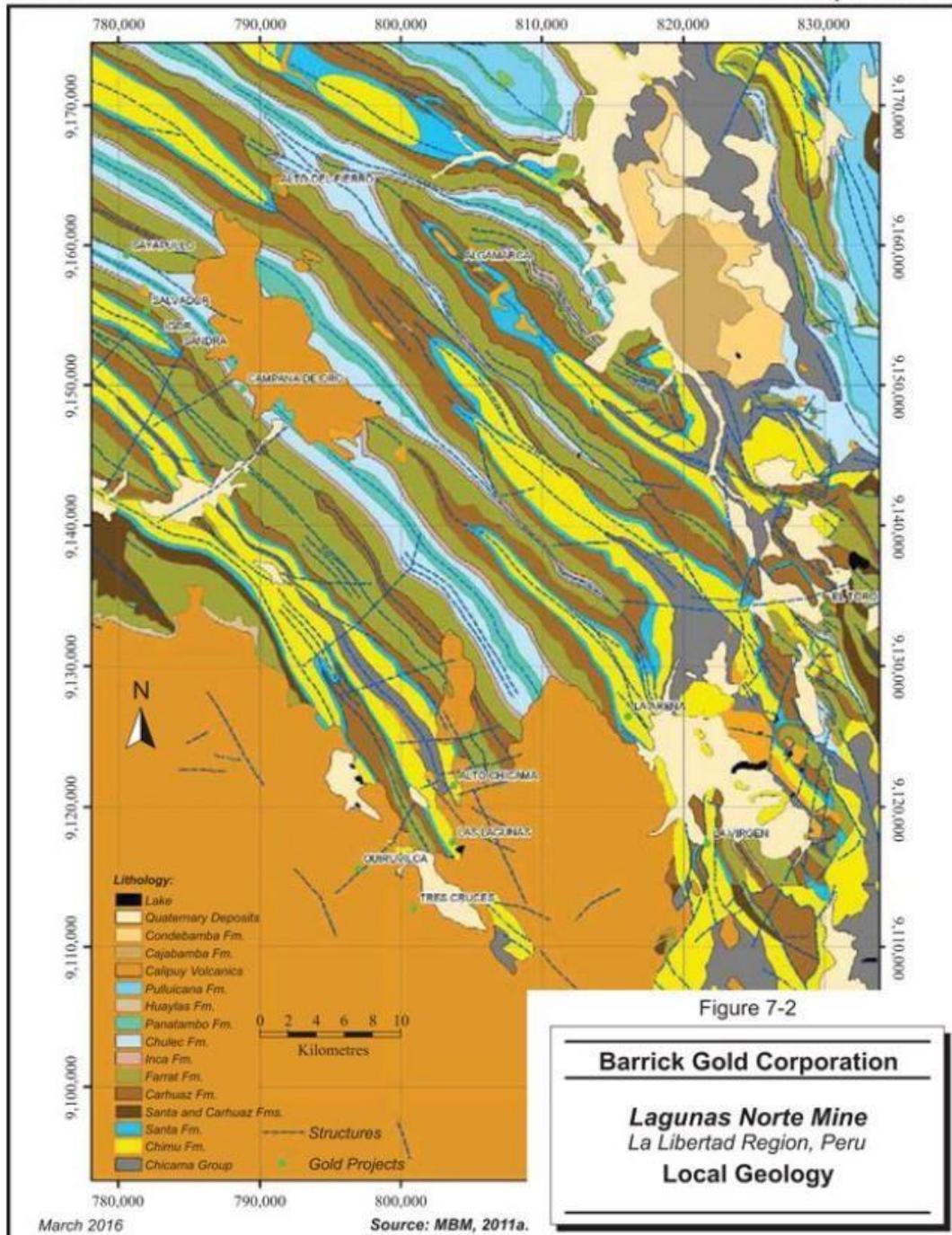


Figura N° 10. Geología Local Lagunas Norte

Fuente: Barrick Gold Corporation – Lagunas Norte Technical Report NI-101

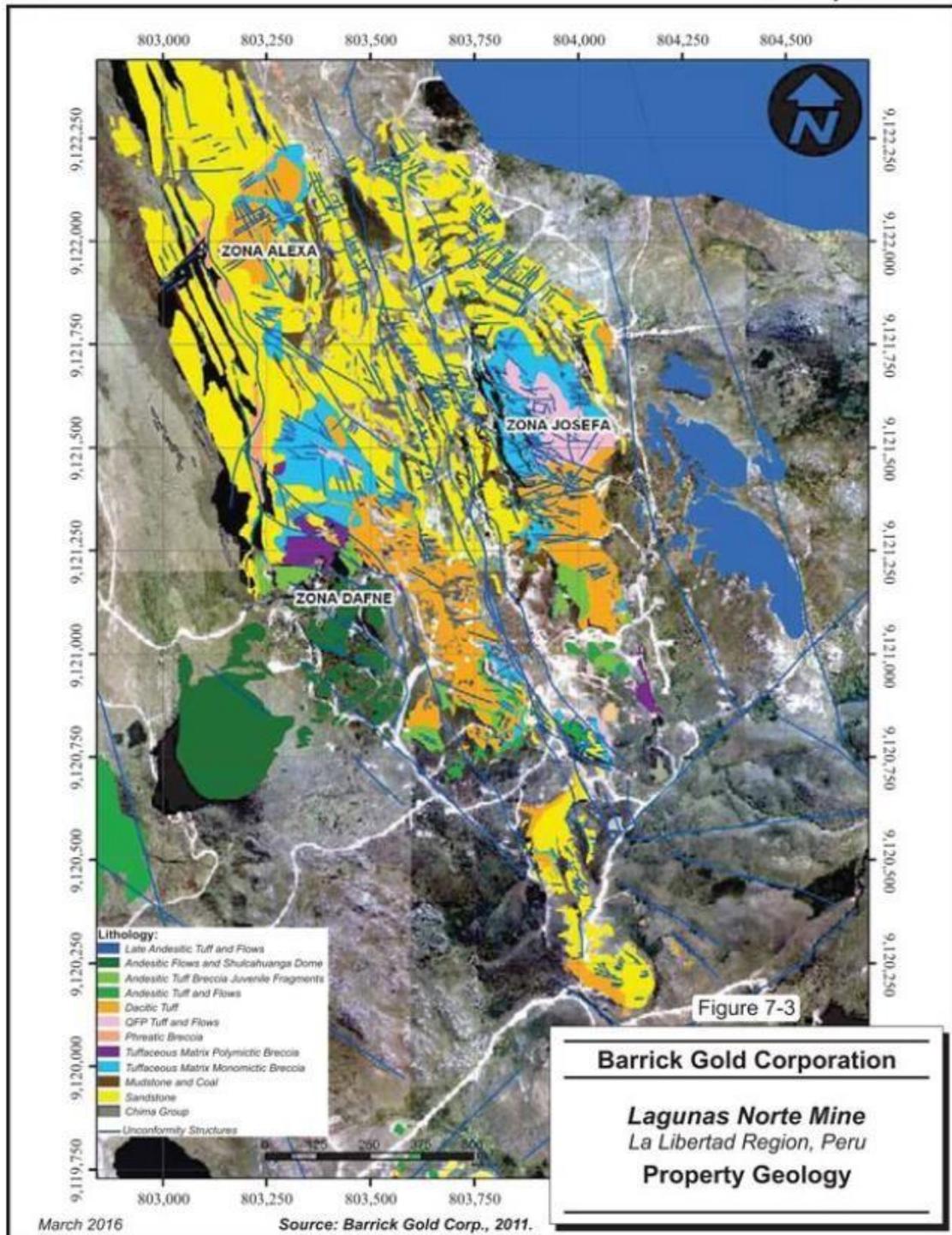


Figura N° 11. Geología de la Propiedad Lagunas Norte

Fuente: Barrick Gold Corporation – Lagunas Norte Technical Report NI 43-101

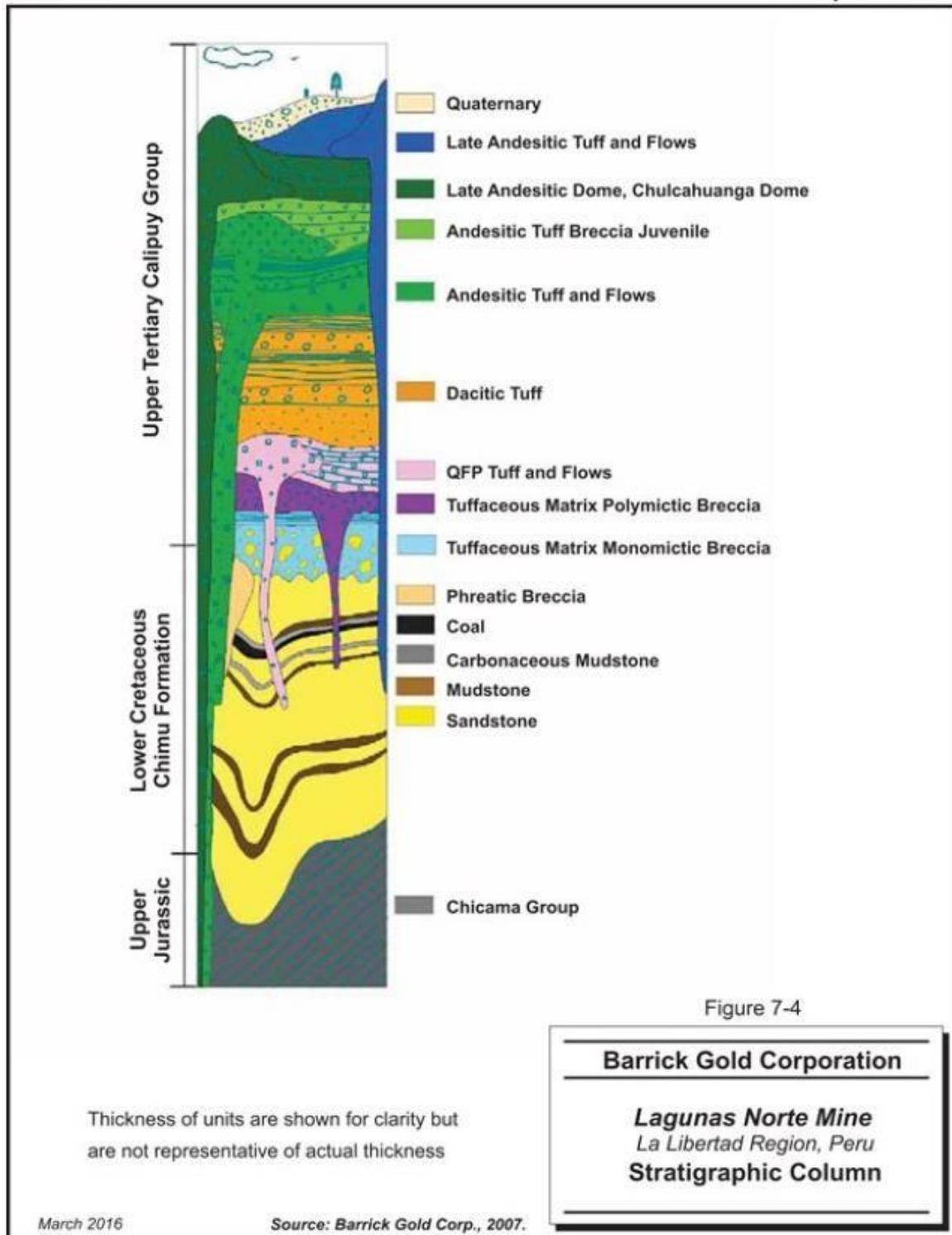


Figura N° 12. Columna Estratigráfica Lagunas Norte

Fuente: Barrick Gold Corporation – Lagunas Norte Technical Report NI 43-101

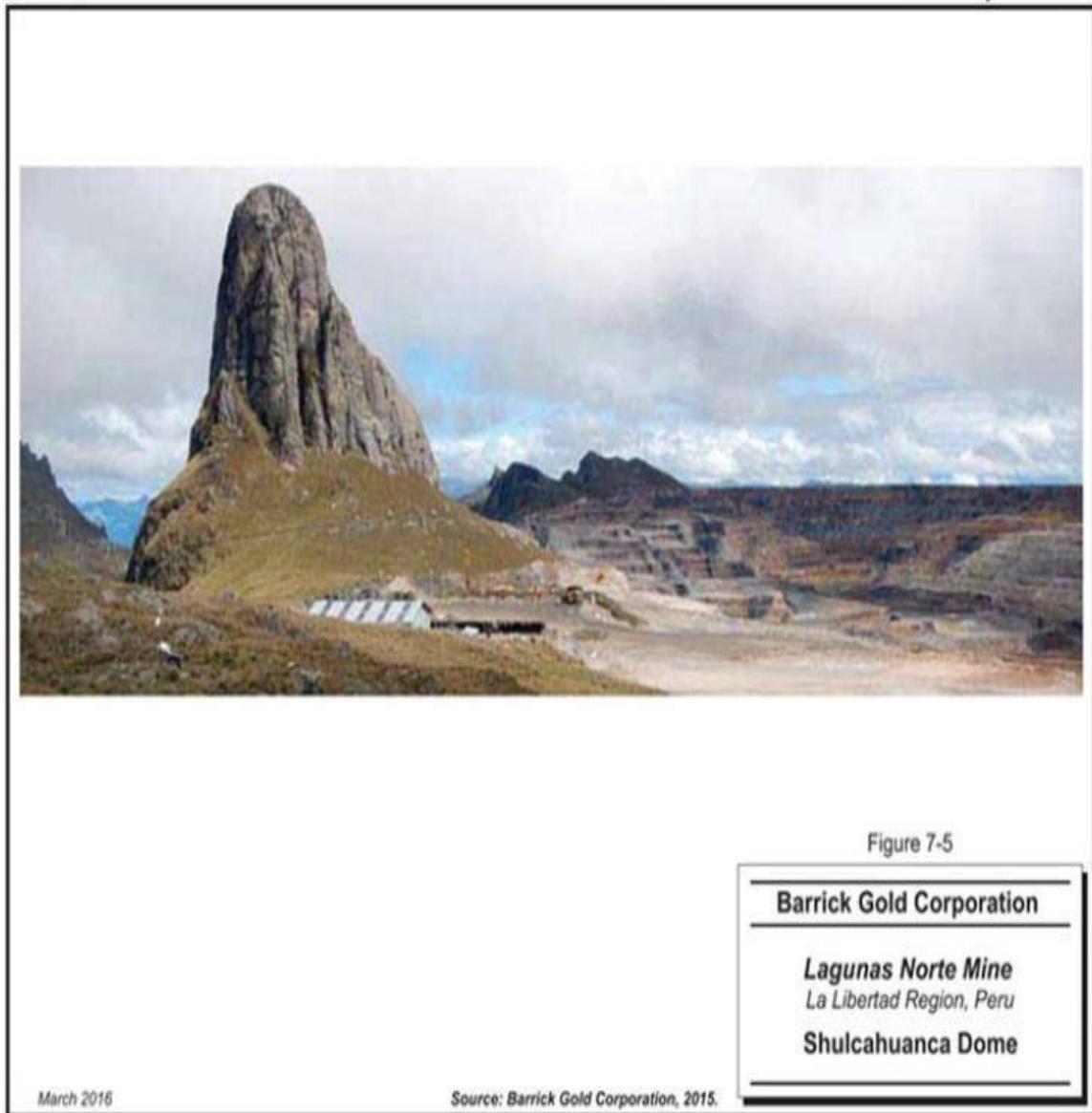


Figura N° 13. Domo Shulcahuanca vista Pit Lagunas Norte

Fuente: Barrick Gold Corporation – Lagunas Norte Technical Report NI 43-101

5.3.4. Estructura mineralizada

Deposito Epitermal

Los depósitos epitermales son aquellos en los que la mineralización ocurrió dentro de 1 a 2 Km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales calientes. Los fluidos se estiman en el rango desde <100°C hasta unos 320°C y durante la formación del

depósito estos fluidos hidrotermales pueden alcanzar la superficie como fuentes termales, similar a las existentes en El Tatio y Puchuldiza en el Norte de Chile o como fumarolas o solfataras. Los depósitos epitermales se encuentran de preferencia en áreas de volcanismo activo alrededor de los márgenes activos de continentes o arcos de islas y los más importantes son los de metales preciosos (Au, Ag), aunque pueden contener cantidades variables de Cu, Pb, Zn, Bi, etc.

La mineralización epitermal de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos. Los de “baja sulfuración” son reducidos y tienen un pH cercano a neutro (la medida de concentración de iones de hidrógeno) y los fluidos de “alta sulfuración”, los cuales son más oxidados y ácidos. Los términos de alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist (1987) y se refieren al estado de oxidación del azufre. En los de alta sulfuración el azufre se presenta como S_4^{+} en forma de SO_2 (oxidado) y en los de baja sulfuración como S^{-2} en forma de H_2S (reducido).

5.3.5. Epitermal de baja Sulfuración

Son una mezcla de aguas-lluvias (aguas meteóricas) que han percolado a la superficie y aguas magmáticas (derivadas de una fuente de roca fundida a mayor profundidad en la tierra) que han ascendido hacia la superficie. Los metales preciosos han sido transportados en solución como iones complejos (en general bisulfurados a niveles epitermales; clorurados a niveles más profundos) y para fluidos de baja sulfuración la precipitación de metales ocurre cuando el fluido hierve al acercarse a la superficie (ebullición).

Los fluidos de BS generalmente forman vetas de relleno con metales preciosos o series de vetas/vetillas más finas. Los depósitos de oro de BS pueden contener cantidades económicas de Ag y cantidades menores de Pb, Zn y Cu, otros minerales asociados con los de BS son cuarzo (incluyendo calcedonia), carbonato, piritita, esfalerita y galena.

5.3.6. Epitermal de Alta Sulfuración

Se derivan principalmente de una fuente magmática y depositan metales preciosos cerca de la superficie cuando el fluido se enfría o se diluye mezclándose con aguas meteóricas. Los metales preciosos en solución derivan directamente del magma o pueden ser lixiviados de las rocas volcánicas huéspedes a medida que los fluidos circulan a través de ellas.

En ambos tipos de depósitos (BS y AS) los fluidos circulan hacia la superficie a través de fracturas en las rocas y la mineralización a menudo se presenta en esos conductos (mineralización

controlada estructuralmente), pero también pueden circular por niveles de rocas permeables y eventualmente mineralizar ciertos estratos.

Los fluidos de AS más calientes y ácidos penetran más en las rocas huéspedes originando cuerpos mineralizados vetiformes, pero también diseminación en las rocas. Los de sistemas auríferos de AS a menudo producen cantidades económicas de Cu y algo de Ag. Otros minerales, mientras los de AS contienen cuarzo, alunita, pirita y enargita.

En lagunas Norte el tipo depósito es de tipo *epitermal de alta sulfuración* y la mineralización está alojada principalmente en la formación Chimú que está dominada por areniscas, así como en las rocas volcánicas de la formación de Calipuy,

Algunos materiales de alta ley corresponden a limolitas carbonosas que están en contacto con un pequeño manto de carbón. Existen muchos lentes y canales de limolitas con una inclinación entre 45 a 60 grados.

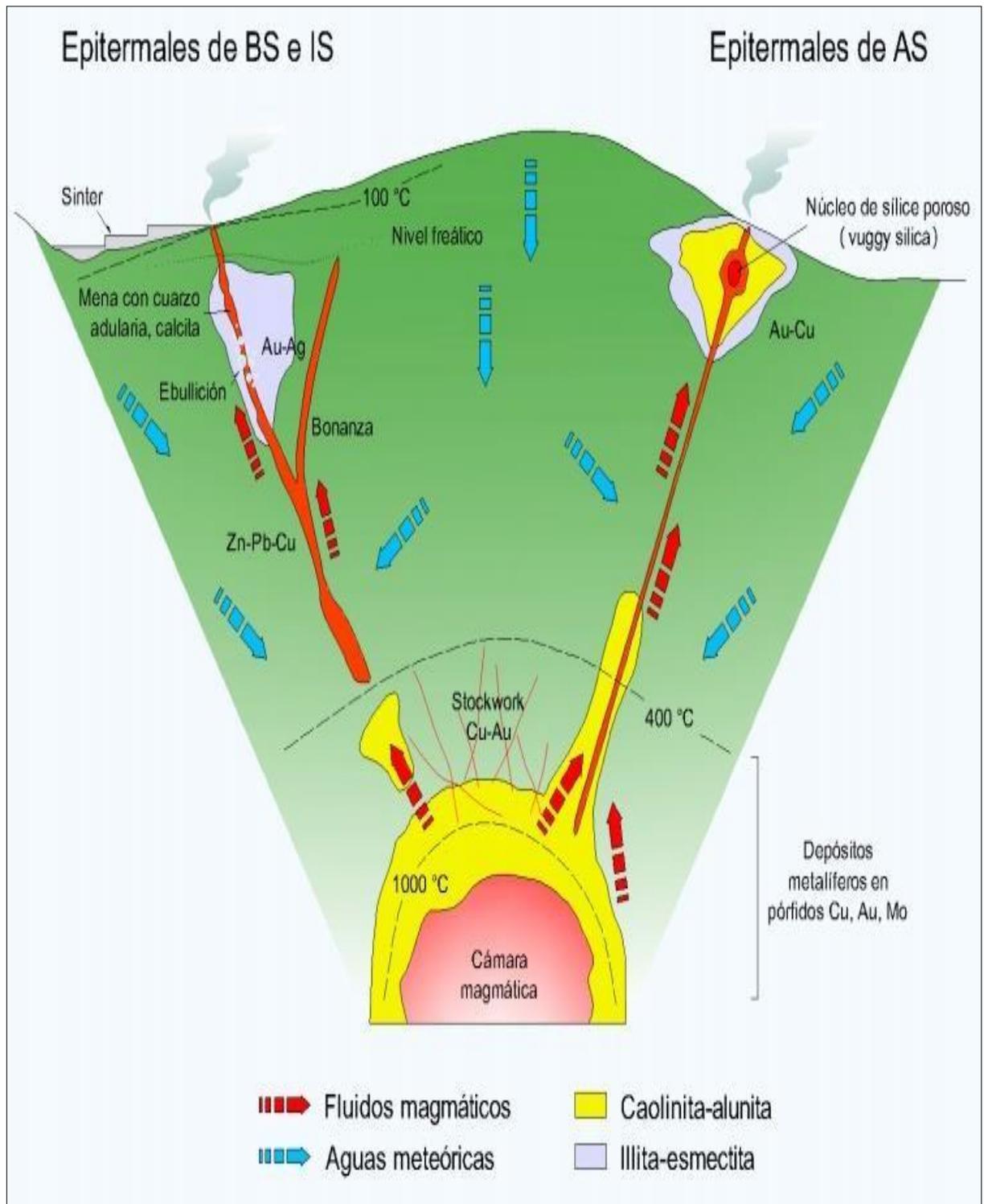


Figura N° 14. Epitermales de Baja y alta Sulfuración

Fuente: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

5.4. Clasificación del Mineral

Tabla N° 3. Clasificación del Mineral

MATERIAL CLASSIFICATION Barrick Gold Corporation – Lagunas Norte Mine									
Material	Type	Description	Destination	Au (g/t)	TCM (%)	S ²⁻ (%)	Cu (ppm)	Au Rec (%)	Code
Ore	M1	Clean oxide	Crusher, Leach Pad, Stockpile	0.400	< 0.1	< 0.25	—	82.9%	11
Ore	M1_LG	Clean oxide	Crusher, Leach Pad, Stockpile	0.239	< 0.1	< 0.25	—	82.9%	11
Ore	M1A	Clean with little sulphides	Crusher, Leach Pad, Stockpile	0.238	< 0.1	≥ 0.25 & < 0.40	< 350	76.5%	12
Ore	M2AL	Slightly carbonaceous	Single pass, Crusher, Stockpile	0.253	≥ 0.1 & < 0.2	< 0.25	—	72.9%	19
Ore	M2AH	Carbonaceous material	Single pass, Crusher, Stockpile	0.378	≥ 0.2 & < 0.5	< 0.25	—	64.1%	20
Ore	M3	With sulphides	Single pass, Crusher, Stockpile	0.287	< 0.10	≥ 0.40	< 350	67.0%	16
Ore	M3A	With sulphides and copper	Single pass, Crusher, Stockpile	0.947	< 0.10	≥ 0.25	≥ 350	21.2%	17
Ore	M3B_Low	With sulphides and TCM	Single pass, Crusher, Stockpile	0.873	≥ 0.1 & < 0.5	≥ 0.25	—	30.0%	18
ROM	M2B	Highly carbonaceous	Single pass, Stockpile	0.861	≥ 0.5 & < 1.5	< 0.25	—	43.0%	15
ROM	M3B_Mid	With sulphides and TCM	Single pass, Stockpile	0.751	≥ 0.5 & < 1.5	≥ 0.25	—	31.7%	21
Waste	M3BH	Highly carbonaceous	Stockpile (Material for CIL)	0.700	≥ 1.5	≥ 0.25	—	29.8%	22
ROM	Mor_Clean*	Clean Colluvial	Leach Pad	0.274	< 0.1	< 0.25	—	73.2%	13
ROM	Mor_Cont*	Colluvial with sulphides and carbonaceous material	Single pass	0.375	≥ 0.0 & < 1.5	≥ 0.25 & < 1.65	—	61.7%	14
ROM	Mor_Clean	Clean Colluvial	Leach Pad	0.237	< 0.1	< 0.25	—	73.2%	13
ROM	Mor_Cont	Colluvial with sulphides and carbonaceous material	Single pass	0.331	≥ 0.0 & < 1.5	≥ 0.25 & < 1.65	—	61.7%	14
Waste	D1	Non-acid generator	Dumps, Construction, Ballast			< 0.1			51
Waste	D2	Potential acid generator	Dumps			≥ 0.1			52
Waste	D3	Carbonaceous	Dumps						53

5.5. Método de Minado

Lagunas Norte es una mina *open pit* con operaciones pala-camión en bancos de 10 metros que ha estado en producción continua desde el 2005. El mineral procedente de la mina es extraído y transportado en camiones hasta la chancadora primaria, luego mediante fajas transportadoras a la chancadora secundaria, y finalmente, a la instalación de la pila de lixiviación. El desmonte se almacena permanentemente en diversos botaderos, dependiendo de las características geoquímicas que determinan su comportamiento ambiental de largo plazo.

5.6. Procesamiento de Mineral

El proceso de recuperación que se usa en Lagunas Norte es un circuito de dos etapas de trituración convencional, seguido de lixiviación en pilas, un proceso de cementación con Zinc Merrill Crowe y CIC para la recuperación de los metales preciosos. Los componentes principales del proceso son

la trituración primaria, trituración secundaria, lixiviación en pilas, planta de recuperación, refinería y planta de tratamiento de agua de descarga.

El circuito de trituración fue diseñado originalmente para operar 42.000 tpd, pero se permite la capacidad de 63.000 tpd. Históricamente, se determinó que la recuperación de oro de la lixiviación en pilas en Lagunas Norte no es demasiado dependiente del tamaño de trituración, por lo que el tamaño se ha incrementado con el tiempo para permitir una mayor cantidad de material que se procesa a través del circuito. El mineral triturado se transporta a una reserva con capacidad en vivo de 2000 ton, de la que se alimenta a las trituradoras secundarias. Desde la trituradora secundaria, el mineral se carga en camiones hacia la plataforma de lixiviación. La cal se añade a los camiones para elevar el pH de la solución de lixiviación.

Sobre la superficie de la pila se aplica una solución de cianuro de sodio (NaCN) diluido en agua, la que se filtra a través de la pila, disolviendo el oro contenido en la roca con la que entre en contacto. La solución de lixiviación es recogida en una poza situada en la base de la pila, y bombeada a una planta de procesamiento, donde se utiliza la tecnología Merrill Crowe (precipitación de los metales preciosos de la solución utilizando polvo metálico de zinc) para recuperar el oro y la plata. La solución de lixiviación es recirculada a la pila de lixiviación, añadiéndose agua de reemplazo y cianuro de sodio (NaCN), según se necesite para mantener el volumen y la química de la solución.

5.7. Optimización de la Operación de Carguío-Acarreo

En las tres zonas de mineralización en Lagunas Norte (Alexa, Josefa y Dafne) obtenemos mineralizaciones con contenidos de Oro complejos, minerales limpios, sulfuros, cobre, carbón, sulfuro y carbón, no todos estos tipos de minerales son enviados a chancadora antes de ir a la poza de lixiviación, algunos son enviados directamente y otros a *Stocks* (Inventarios).

5.7.1. Equipos y Productividad

La productividad depende de factores como tipo de frente de minado (material grueso, piso desnivelado, altura de frente, blending de material, etc), antigüedad del equipo y pericia del operador principalmente.



Figura N° 15. KOMATSU PC 4000-6

Fuente: Komatsu Ltd. Japan.

Tabla N° 4. Cuadro de Productividad de la Pala PC 4000-6

Densidad suelta	1.69
densidad in situ	2.54
Bucket Size (m ³)	23.0
Bucket Fill Factor (%)	98%
Volume per Cycle (m ³)	22.5
Tonnage per Cycle (t)	38.1
Tiempo ciclo	0.6
Nro de ciclo	5
Ton por hora	3810
Disp	0.72
Utilizacion	0.75
Ton por hora-real	2057



Figura N° 16. KOMATSU WA 1200

Fuente: Komatsu Ltd. Japan.

Tabla N° 5. Cuadro de productividad del Cargador WA 1200

Densidad suelta	1.69
densidad in situ	2.54
Bucket Size (m ³)	20.0
Bucket Fill Factor (%)	98%
Volume per Cycle (m ³)	19.6
Tonnage per Cycle (t)	33.1
Tiempo ciclo	0.6
Nro de ciclo	6
Ton por hora	3310
Disp	0.76
Utilizacion	0.88
Ton por hora-real	2214



Figura N° 17. CAMION KOMATSU 730E

Fuente: Komatsu Ltd. Japan.

La mina Lagunas Norte cuenta con volquetes de acarreo Komatsu, con disponibilidad y utilización de 91% y 81% respectivamente para fines de este estudio, con las siguientes características:

Marca: Komatsu

Modelo: 730E

Motor: Diesel

Tracción: Eléctrica

Tolva: Light

Capacidad de carga: 190 Tn

5.7.2. Descripción del Proceso de Carguío-Acarreo

El proceso de envío de material a chancadora se realiza generalmente con dos equipos de carguío en frentes de minado diferentes para cumplir con los planes de producción:



Figura N° 18. Sistema Tradicional de Carguío - Acarreo

Fuente: Elaboración propia

5.7.3. Toma de Datos de Campo

Tiempo de proceso de carguío-acarreo desde diferentes niveles de minado hacia chancadora.

Tabla N° 6. Registro de tiempos NIVEL 4160. PALA hacia la chancadora

TIEMPO CARGUÍO (min)	TIEMPO CUADRADO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA CHANCADO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
2.92	0.61	0.76	8.66	1.27	0.68	15
2.63	0.69	0.92	9.10	1.36	0.48	15
1.26	0.69	1.02	7.43	1.07	0.32	12
2.92	0.82	1.13	9.31	1.59	0.30	16
3.09	0.85	1.09	8.31	1.67	0.40	15
2.81	0.51	0.90	9.43	1.49	0.54	16
3.20	0.46	0.96	7.99	1.14	0.42	14
3.69	0.55	0.89	7.59	1.00	0.44	14
3.05	0.64	0.66	9.07	2.06	0.48	16
2.62	0.57	1.33	9.86	2.12	0.48	17
2.53	0.55	1.15	9.15	1.34	0.30	15
2.73	0.72	1.27	9.30	1.52	0.45	16
3.43	0.56	0.90	9.40	2.21	0.28	17
2.19	0.39	1.36	10.41	1.18	0.38	16
3.55	0.78	0.59	7.43	1.15	0.44	14
2.94	0.49	0.89	11.07	1.37	0.36	17
3.67	0.72	0.85	9.68	0.93	0.57	16
2.75	0.62	1.02	9.38	2.02	0.50	16
2.75	0.66	0.76	8.89	1.52	0.51	15
3.47	0.40	0.95	7.86	1.83	0.31	15
3.54	0.65	1.13	7.99	1.75	0.51	16
2.69	0.70	1.16	9.27	1.18	0.32	15
2.68	0.48	1.00	10.00	1.63	0.34	16
2.50	0.67	1.03	8.55	1.34	0.30	14
3.28	0.57	1.04	9.96	2.23	0.41	17
4.00	0.58	1.28	8.27	1.07	0.13	15
2.49	0.63	1.24	8.81	1.87	0.39	15
3.15	0.58	0.95	9.29	1.60	0.34	16
3.28	0.63	0.83	9.19	1.28	0.39	16
2.61	0.59	1.03	10.82	0.86	0.48	16

Tabla N° 7. Registro de tiempos NIVEL 4070. CARGADOR hacia la chancadora

TIEMPO CARGUÍO (min)	TIEMPO CUADRADO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA CHANCADO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
3.23	0.30	1.00	10.66	1.14	0.36	17
3.43	0.42	1.12	9.42	1.68	0.34	16
2.87	0.53	0.76	10.99	1.40	0.56	17
3.33	0.28	0.86	11.08	1.62	0.45	18
3.63	0.34	1.12	10.65	2.09	0.19	18
3.55	0.48	1.10	10.56	1.11	0.38	17
3.68	0.31	1.18	8.65	1.22	0.47	16
3.21	0.47	0.96	10.99	1.35	0.41	17
4.28	0.48	0.90	9.37	1.18	0.48	17
4.09	0.52	0.96	9.10	1.58	0.53	17
3.21	0.38	1.22	9.63	1.73	0.13	16
2.97	0.34	1.49	9.33	1.43	0.28	16
3.40	0.48	1.40	8.87	1.57	0.47	16
3.34	0.43	0.92	11.05	1.15	0.42	17
3.69	0.35	1.03	10.81	2.00	0.49	18
2.75	0.37	0.79	10.38	1.22	0.44	16
3.15	0.52	0.80	10.77	1.44	0.51	17
3.53	0.35	0.80	10.60	1.36	0.37	17
3.39	0.50	0.79	9.85	1.23	0.27	16
2.97	0.44	1.30	11.03	1.61	0.34	18
2.86	0.28	1.00	10.03	1.34	0.41	16
3.80	0.29	0.98	9.49	1.81	0.47	17
3.18	0.48	0.96	8.87	0.67	0.32	14
2.97	0.47	0.96	10.96	2.05	0.42	18
3.62	0.49	0.86	10.59	1.90	0.41	18
3.77	0.27	0.91	9.54	1.55	0.49	17
3.72	0.40	1.12	9.88	1.97	0.46	18
2.99	0.38	1.15	11.09	1.24	0.48	17
3.72	0.52	0.60	9.64	2.43	0.39	17
3.34	0.40	1.20	9.55	1.57	0.36	16

Tabla N° 8. Registro de tiempos NIVEL 4040. (CARGADOR) hacia chancadora

TIEMPO CARGUÍO (min)	TIEMPO CUADRADO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA CHANCADO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
3.15	0.39	0.87	7.40	2.14	0.45	14
4.29	0.50	1.02	6.79	1.32	0.38	14
3.15	0.29	1.02	9.32	2.15	0.60	17
3.31	0.15	0.94	5.83	1.58	0.43	12
3.26	0.25	0.88	8.04	1.81	0.61	15
3.80	0.30	1.11	8.78	1.60	0.39	16
4.28	0.50	1.04	8.90	2.38	0.40	17
3.25	0.51	1.11	7.19	0.91	0.49	13
3.47	0.48	0.85	7.35	1.59	0.17	14
2.89	0.41	0.95	6.61	1.22	0.45	13
3.61	0.57	0.78	9.06	1.41	0.37	16
3.74	0.57	1.25	10.33	1.69	0.25	18
3.46	0.34	0.55	7.95	0.57	0.36	13
3.32	0.41	0.94	9.48	1.27	0.51	16
2.66	0.40	1.05	8.10	0.86	0.39	13
3.76	0.52	1.09	9.21	1.40	0.36	16
3.20	0.58	0.71	6.96	1.50	0.29	13
4.22	0.42	1.14	6.08	1.94	0.44	14
3.69	0.24	1.19	7.69	2.02	0.44	15
3.57	0.39	0.79	8.91	1.07	0.47	15
3.97	0.42	1.30	7.35	0.96	0.58	15
3.53	0.39	0.76	9.53	1.44	0.49	16
4.01	0.47	1.05	9.12	1.30	0.39	16
3.40	0.33	1.34	6.85	1.17	0.45	14
3.28	0.47	0.96	8.41	1.74	0.51	15
2.74	0.38	1.14	8.58	1.26	0.41	15
3.53	0.22	0.62	8.18	1.52	0.47	15
4.12	0.51	0.74	9.74	1.26	0.29	17
3.16	0.53	1.22	8.98	1.97	0.42	16
2.95	0.41	1.06	8.28	1.83	0.55	15

Además, según el cuadro de producción de plan semanal (semana 32).

Tabla N° 9. Cuadro de producción de plan semanal

Nivel	Tonelaje	Ley(gr/tn)	Nro Ciclos
4040	141961	0.81	747
4050	39660	0.9	209
4070	69631	1.3	366
4160	173708	1.1	914

Tenemos el cuadro de tiempos del Sistema Tradicional:

Tabla N° 10. Cuadro de tiempos Sistema Tradicional

DESTINO CHANCADO	TIEMPO CARGUIO (min)	TIEMPO CUADRADO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA CHANCADO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
Pala de Niv 4160	3	0.6	1	9.11	1.5	0.4	16
Cargador de Niv 4070	3.5	0.4	1	10.11	1.5	0.4	17
Cargador de Niv 4040	3.5	0.4	1	8.31	1.5	0.4	15
Cargador de Niv 4050	3.5	0.4	1	8	1.5	0.4	15

Y considerando el costo operativo de cada camión de \$250/h, desarrollamos la siguiente. tabla tomando en cuenta el cuadro de tiempo del sistema tradicional.

Tabla N° 11. Costos de Acarreo

DESTINO CHANCADO	COSTO (\$/Ciclo)	NUMERO CICLO	COSTO (\$)
Pala de Niv 4160	65	914	59410.000
Cargador de Niv 4070	70	366	25620.000
Cargador de Niv 4040	63	747	47061.000
Cargador de Niv 4050	62	209	12958.000
Tractor de llantas	-	-	5023.000
COSTO TOTAL			150,072.000



Figura N° 19. Sistema Propuesto

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 12. Registro de tiempos Pala-Cargador Nivel 4160 hacia Chancadora

TIEMPO CARGUÍO (min)	TIEMPO CUADRA DO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA A CHANCA DO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
1.58	0.39	0.33	9.31	1.55	0.53	14
1.54	0.52	0.19	9.01	1.71	0.48	13
1.55	0.35	0.17	8.26	1.31	0.33	12
1.72	0.40	0.28	8.40	1.92	0.40	13
1.70	0.42	0.37	8.26	1.32	0.52	13
1.53	0.37	0.31	9.99	1.42	0.61	14
1.53	0.63	0.05	10.56	1.42	0.42	15
1.35	0.52	0.30	8.56	1.78	0.31	13
1.46	0.36	0.15	8.05	1.27	0.29	12
0.99	0.42	0.26	10.13	1.07	0.37	13
1.13	0.44	0.10	10.33	1.13	0.33	13
1.55	0.32	0.19	9.62	1.50	0.34	14
1.48	0.47	0.20	9.44	0.80	0.48	13
1.45	0.41	0.23	8.84	0.82	0.66	12
1.45	0.32	0.20	9.89	1.83	0.42	14
1.28	0.56	0.20	9.41	1.66	0.31	13
1.84	0.43	0.04	8.86	2.13	0.40	14
1.37	0.13	0.27	7.78	1.29	0.38	11
1.49	0.33	0.19	9.44	1.33	0.38	13
1.57	0.34	0.16	9.96	2.16	0.42	15
1.32	0.45	0.08	7.42	1.32	0.46	11
1.28	0.33	0.13	9.34	1.03	0.31	12
1.51	0.44	0.25	10.41	1.35	0.51	14
1.45	0.57	0.35	10.04	1.03	0.47	14
1.25	0.29	0.19	10.36	1.71	0.31	14
1.24	0.29	0.24	8.19	1.15	0.43	12
1.39	0.48	0.21	9.03	2.04	0.39	14
1.39	0.44	0.17	9.03	0.96	0.41	12
1.50	0.33	0.16	9.37	0.76	0.50	13
1.44	0.40	0.24	10.25	1.82	0.44	15

Tabla N° 13. Cuadro de tiempos

DESTINO CHANCADO	TIEMPO CARGUIO (min)	TIEMPO CUADRADO (min)	TIEMPO ESPERA (min)	TIEMPO IDA Y REGRESO (min)	T. DESCARGA CHANCADO (min)	OTROS (min)	TOTAL (min)
Cargador de Niv 4040	3.5	0.4	1	8.31	1.5	0.4	15
Cargador de Niv 4050	3.5	0.4	1	8	1.5	0.4	15
Cargador de Niv 4070	3.5	0.4	1	10.11	1.5	0.4	17
S01+S04 de 4160	1.5	0.4	0.2	9.11	1.4	0.4	13

Tabla N° 14. Productividad del Sistema Propuesto

Densidad suelta	1.69
densidad in situ	2.54
Loader Bucket Size (m ³)	20.0
Shovel Bucket Size (m ³)	23.0
Bucket Fill Factor (%)	98%
Loader Volume per Cycle (m ³)	19.6
Shovel Volume per Cycle (m ³)	22.5
Tiempo carguio	1.5
Ton por hora	7600
Disp	0.74
Utilizacion	0.82
Ton por hora-real	4584

Al ser más productivo, se verifica una baja en el costo S01+S04

Tabla N° 15. Costos asociados al sistema propuesto

S01: Pala hidráulica Nro. 01

S04: Cargador WA1200 Nro. 2

DESTINO CHANCADO	\$/ciclo
Cargador de 4040	63
Cargador de 4050	62
Cargador de 4070	70
S01+S04 de 4160	53

Tabla N° 16. Cuadro de ciclos máximos y mínimos

Nivel	Ton Max	ciclo max	Ton Min	ciclo min
4040	143961	758	139961	737
4050	41660	219	37660	198
4070	71631	377	67631	356
4160	175708	925	171708	904

Los ciclos máximos y mínimos son obtenidos de la confiabilidad del plan semanal (+-5%), considerando la producción de chancado de 424,960 TM en promedio con capacidad de camión de 190 TM.

La productividad de los equipos de carguío depende de su disponibilidad y utilización que se considera como una restricción.

5.7.4. Optimización y aplicación de la Programación Lineal

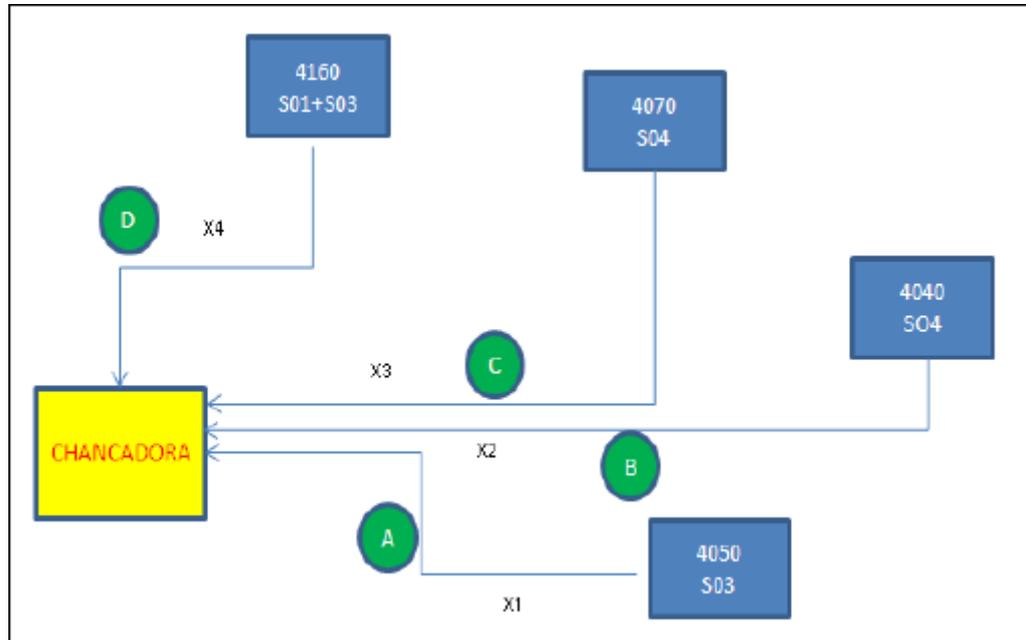


Figura N° 20. Distribución de Equipos con el sistema propuesto

Fuente: Elaboración Propia

El caso propuesto nos lleva a un problema de Programación Lineal de minimización de costos expresado en la función objetivo:

$$\text{MINIMIZAR (Z)} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4$$

Donde:

Z: Valor de la función optimizada.

C_i : Costo en \$(Dólares) por ciclo.

X_i : Número de ciclos.

X_1 : Número de ciclos provenientes de banco 4040.

X_2 : Número de ciclos provenientes de banco 5050.

X_3 : Número de ciclos provenientes de banco 4070.

X_4 : Número de ciclos provenientes de banco 4160.

Entonces reemplazando con los datos obtenidos tenemos:

$$\text{MINIMIZAR (Z)} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4$$

Restricciones:

1.-Número de ciclos Máximos

$$X_1 \leq 758$$

$$X_2 \leq 219$$

$$X_3 \leq 377$$

$$X_4 \leq 925$$

2.- Número de ciclos Mínimos

$$X_1 \geq 737$$

$$X_2 \geq 198$$

$$X_3 \geq 356$$

$$X_4 \geq 904$$

3.-Restricción por capacidad de chancado

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \leq 2237$$

4.-Restricción por disponibilidad de equipo

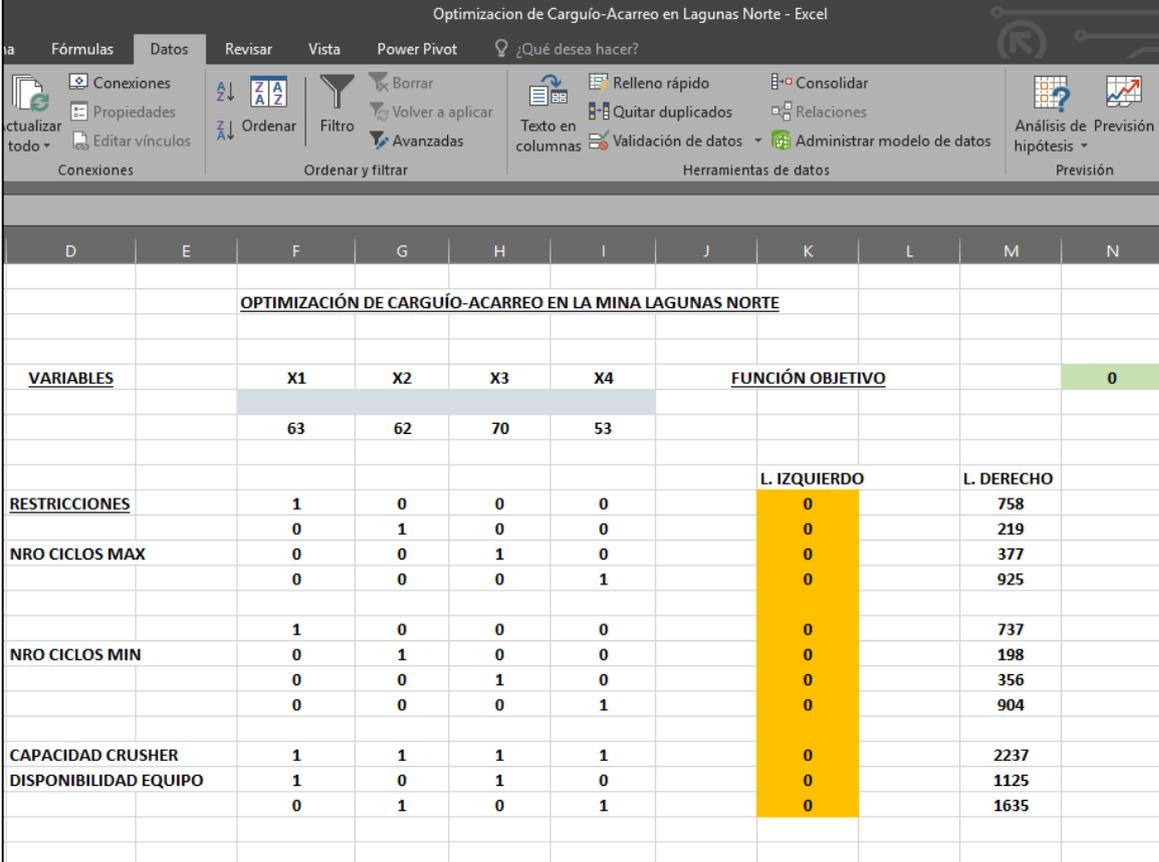
$$X_1 + X_3 \leq 1125$$

$$X_2 + X_4 \leq 1635$$

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1. Ingreso de datos en la hoja de cálculo EXCEL

En la fig. N° 12 que a continuación presentamos tenemos una hoja de cálculo en EXCEL en la cual se tiene una estructura de celdas para ingresar las variables, restricciones, así como la función objetivo, éste es el primer paso para luego ejecutar la subrutina SOLVER.



	X1	X2	X3	X4	FUNCIÓN OBJETIVO	
VARIABLES	63	62	70	53		0
RESTRICCIONES	1	0	0	0	L. IZQUIERDO	L. DERECHO
	0	1	0	0	0	758
NRO CICLOS MAX	0	0	1	0	0	219
	0	0	0	1	0	377
	0	0	0	1	0	925
NRO CICLOS MIN	1	0	0	0	0	737
	0	1	0	0	0	198
	0	0	1	0	0	356
	0	0	0	1	0	904
CAPACIDAD CRUSHER	1	1	1	1	0	2237
DISPONIBILIDAD EQUIPO	1	0	1	0	0	1125
	0	1	0	1	0	1635

Figura N° 21. Ingreso de datos del problema en EXCEL

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Ejecución del complemento SOLVER

Luego del ingreso de datos en forma ordenada en la hoja de cálculo ejecutamos la subrutina SOLVER y nos aparece la siguiente ventana en la cual enlazamos las celdas que definimos en EXCEL previamente.

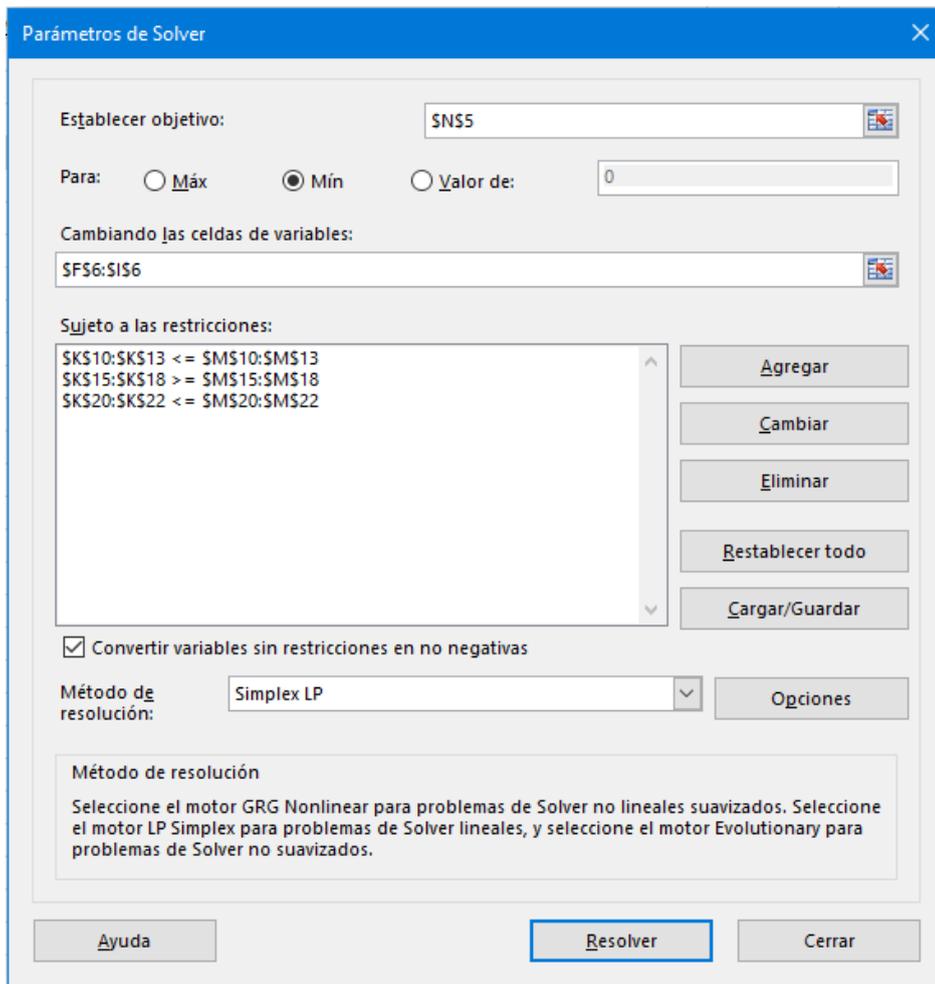


Figura N° 22. Interface de Ingreso de datos de SOLVER

Fuente: Excel SOLVER.

6.3. Reporte de Solución generada por SOLVER

En éste reporte aparece la solución óptima encontrada por SOLVER o sea los valores de las variables variables X_1 , X_2 , X_3 , X_4 y el valor de la Función Objetivo que en nuestro problema es 131539, para ello hace uso del *Algoritmo matemático* SIMPLEX.

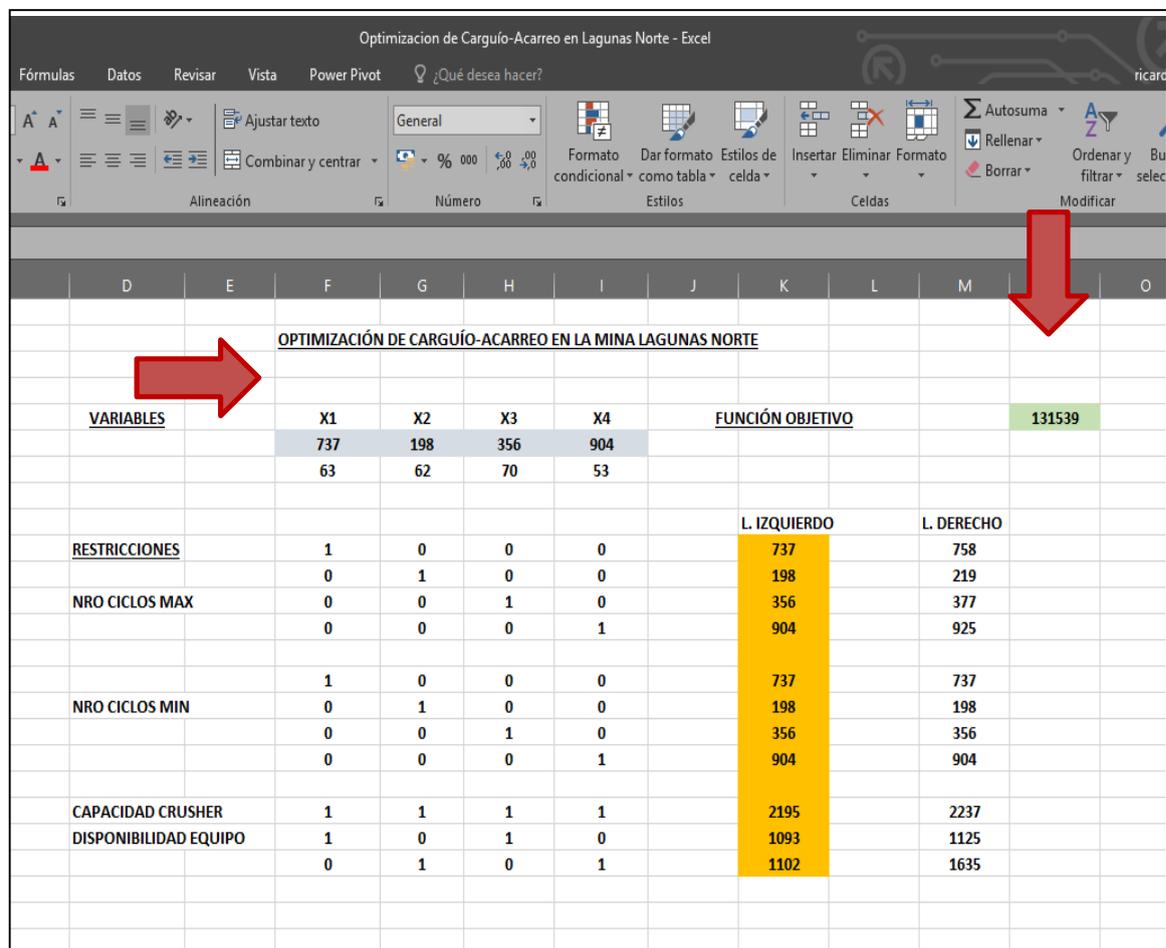
Hoja de cálculo: [Optimizacion de Carguío-Acarreo en Lagunas Norte.xlsx]Hoja1					
Informe creado: 8/08/2017 10:48:47 a. m.					
Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.					
Motor de Solver					
Motor: Simplex LP					
Tiempo de la solución: 0.016 segundos.					
Iteraciones: 4 Subproblemas: 0					
Opciones de Solver					
Tiempo máximo Ilimitado, Iteraciones Ilimitado, Precision 0.000001, Usar escala automática					
Máximo de subproblemas Ilimitado, Máximo de soluciones de enteros Ilimitado, Tolerancia de enteros 1%, Asumir no negativo					
Celda objetivo (Mín)					
Celda	Nombre	Valor original	Valor final		
\$N\$5	FUNCIÓN OBJETIVO	131539	131539		
Celdas de variables					
Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero	
\$F\$6	X1	737	737	Continuar	
\$G\$6	X2	198	198	Continuar	
\$H\$6	X3	356	356	Continuar	
\$I\$6	X4	904	904	Continuar	
Restricciones					
Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$K\$10	RESTRICCIONES L. IZQUIERDO	737	\$K\$10<=\$M\$10	No vinculante	21
\$K\$11	L. IZQUIERDO	198	\$K\$11<=\$M\$11	No vinculante	21
\$K\$12	NRO DE CICLOS MÁXIMOS L. IZQUIERDO	356	\$K\$12<=\$M\$12	No vinculante	21
\$K\$13	L. IZQUIERDO	904	\$K\$13<=\$M\$13	No vinculante	21
\$K\$15	L. IZQUIERDO	737	\$K\$15>=\$M\$15	Vinculante	0
\$K\$16	NRO DE CICLOS MÍNIMOS L. IZQUIERDO	198	\$K\$16>=\$M\$16	Vinculante	0
\$K\$17	L. IZQUIERDO	356	\$K\$17>=\$M\$17	Vinculante	0
\$K\$18	L. IZQUIERDO	904	\$K\$18>=\$M\$18	Vinculante	0
\$K\$20	CAPACIDAD DE CHANCADO L. IZQUIERDO	2195	\$K\$20<=\$M\$20	No vinculante	42
\$K\$21	DISPONIBILIDAD DE EQUIPO L. IZQUIERDO	1093	\$K\$21<=\$M\$21	No vinculante	32
\$K\$22	L. IZQUIERDO	1102	\$K\$22<=\$M\$22	No vinculante	533

Figura N° 23. Informe de Solución de SOLVER

Fuente: Excel SOLVER.

6.4. Visualización de la solución en EXCEL

En la hoja de cálculo que definimos previamente también podemos observar la solución, la flecha horizontal en rojo nos indica los valores encontrados de las variables y la flecha vertical en rojo nos indica el valor de la función objetivo.



OPTIMIZACIÓN DE CARGUÍO-ACARREO EN LA MINA LAGUNAS NORTE							
VARIABLES	X1	X2	X3	X4	FUNCIÓN OBJETIVO		131539
	737	198	356	904			
	63	62	70	53			
RESTRICCIONES					L. IZQUIERDO	L. DERECHO	
	1	0	0	0	737	758	
	0	1	0	0	198	219	
NRO CICLOS MAX	0	0	1	0	356	377	
	0	0	0	1	904	925	
NRO CICLOS MIN	1	0	0	0	737	737	
	0	1	0	0	198	198	
	0	0	1	0	356	356	
	0	0	0	1	904	904	
CAPACIDAD CRUSHER	1	1	1	1	2195	2237	
DISPONIBILIDAD EQUIPO	1	0	1	0	1093	1125	
	0	1	0	1	1102	1635	

Figura N° 24. Visualización de la solución en EXCEL

Fuente: Elaboración Propia.

6.5. Informe de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es el estudio de como los cambios en los coeficientes de un problema de Programación Lineal afectan a la solución óptima.

Microsoft Excel 16.0 Informe de sensibilidad
Hoja de cálculo: [Optimizacion de Carguío-Acarreo en Lagunas Norte.xlsx]Hoja1
Informe creado: 8/08/2017 11:50:48 a. m.

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
\$F\$6 X1		737	0	63	1E+30	63
\$G\$6 X2		198	0	62	1E+30	62
\$H\$6 X3		356	0	70	1E+30	70
\$I\$6 X4		904	0	53	1E+30	53

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
\$K\$10	RESTRICCIONES L. IZQUIERDO	737	0	758	1E+30	21
\$K\$11	L. IZQUIERDO	198	0	219	1E+30	21
\$K\$12	NRO DE CICLOS MÁXIMOS L. IZQUIERDO	356	0	377	1E+30	21
\$K\$13	L. IZQUIERDO	904	0	925	1E+30	21
\$K\$15	L. IZQUIERDO	737	63	737	21	737
\$K\$16	NRO DE CICLOS MÍNIMOS L. IZQUIERDO	198	62	198	21	198
\$K\$17	L. IZQUIERDO	356	70	356	21	356
\$K\$18	L. IZQUIERDO	904	53	904	21	904
\$K\$20	CAPACIDAD DE CHANCADO L. IZQUIERDO	2195	0	2237	1E+30	42
\$K\$21	DISPONIBILIDAD DE EQUIPO L. IZQUIERDO	1093	0	1125	1E+30	32
\$K\$22	L. IZQUIERDO	1102	0	1635	1E+30	533

Figura N° 25. Informe de Sensibilidad

Fuente: Excel SOLVER

Celdas de Variables

Valor Final: nos recuerda los valores óptimos de las variables controlables.

Coste reducido: indica cuánto deberá cambiar el coeficiente de la función objetivo para que la variable tome un valor positivo. En este caso, las variables controlables son positivas por lo que su costo reducido es cero.

Coefficiente objetivo: son los coeficientes de la función objetivo.

Aumento permisible: incremento admisible en los coeficientes de la función objetivo sin que cambien los valores óptimos de las variables controlables.

Disminución permisible: disminución admisible en los coeficientes de la función objetivo sin que cambien los valores óptimos de las variables controlables.

Restricciones

Valor final: es el valor que toma el lado izquierdo de cada restricción en la solución óptima.

Sombra precio: son los precios duales, o precios sombra de los recursos (o requerimientos) indicados en las restricciones. Indican la mejora en el valor de la función objetivo si se "relaja" una desigualdad, o el empeoramiento si se la restringe.

Restricción lado derecho: indican los lados derechos de las desigualdades.

Aumento permisible: representa en cuánto puede incrementarse el lado derecho (Constante) sin que se altere el precio Dual.

Disminución admisible: indica en cuánto puede disminuir el lado derecho de la restricción sin que cambie el precio dual de un recurso (o requerimiento).

DISCUSIÓN

Luego de realizados los cálculos mediante el modelo matemático presentado, podemos afirmar que:

Se ha verificado la validez de nuestra Hipótesis que el impacto de la Programación lineal con el uso de solver es positivo porque se optimizó los costos en el proceso de las operaciones específicas de carguío-acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, la Libertad.

Se ha minimizado los costos de carguío-acarreo en \$ $(150,072.00 - 131,539.00) = \$18,533.00$ lo cual constituye un 12,35 % de ahorro en el proceso.

Se determinó que el impacto de la decisión es positivo a través del programa solver en el óptimo desempeño de las palas hidráulicas y cargadores frontales.

Se dio a conocer la gran influencia que tiene la decisión que se toma a través del programa solver en la optimización del tiempo de carguío.

Se determinó que el impacto de las restricciones identificadas por solver son óptimas en el desempeño de los camiones komatsu.

La Programación Lineal se puede utilizar con éxito en la optimización de procesos en operaciones mineras, la disponibilidad y uso de la licencia comercial del software Excel SOLVER® constituye una alternativa práctica y económica.

La Programación Lineal propone formas particulares de abordaje a problemas empresariales, aprovechando los actuales avances informáticos, ofreciendo gran ayuda a la hora de valorar futuras estrategias de desarrollo y mejora de una empresa brindando un plan óptimo detallado para lograr el resultado (máximo o mínimo) óptimo además de indicar el uso de cada recurso limitante en el plan óptimo.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que hay un impacto positivo en base a los resultados obtenidos, que efectivamente a través de la aplicación de la programación lineal con el uso de solver, se ha optimizado un 12,35% del costo total del proceso de carguío-acarreo de minerales en la mina Lagunas Norte, la Libertad.

- Se determinó que el impacto de la decisión que se toma a través del programa solver es beneficioso en el óptimo desempeño de los equipos de carguío (palas hidráulicas y cargadores frontales)
- Se dio a conocer la gran influencia que tiene la decisión que se toma a través del programa solver en la optimización del tiempo de carguío.
- Se determinó que el impacto de las restricciones identificadas por solver son beneficiosos en el óptimo desempeño de los camiones Komatsu.
- Se dio a conocer la gran influencia que tiene las restricciones identificadas por el programa solver en la optimización del tiempo de acarreo.

RECOMENDACIONES

i.-Se recomienda una mayor investigación en el área de la Matemática Aplicada y Optimización con Programación Lineal aplicada a procesos de producción mineros maximización de la utilidad económica, estimación de reservas minerales, problemas de transporte etc.

ii.-Desarrollar cursos y seminarios en alianza con empresas privadas y otras universidades sobre aplicaciones como SOLVER, CPLEX relacionados a temas de Optimización.

REFERENCIAS

Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2010). *Mine Design under Geologic and Market Uncertainties. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.*

Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2009). *Accounting for Joint Ore Supply, Metal Price and Exchange Rate Uncertainties in Mine Design. Orebody modelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.*

Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2007). *Evaluating mine plans under uncertainty: ¿can be real option make a difference? OrebodyModelling and strategic Mine Planning. pp 305 - 308.*

Agbadudu, A. B. (1996). *Elementary operations research (Volume I)*. Benin City: University of Benin Press.

Anyebe, J. A. B. (2001). *Business mathematics for management and social science students*. Idah: Akata Nigeria Enterprises.

Arias, J., Castro, R., et al., (2008). *MININ 2008 III International Conference on Mining Innovation. August 6 to 8, 2008. Santiago. pp 498.*

Askari-Nasab, H., Tabesh, M. and Badiozamani, M., (2010). *Creating Mining Cuts Using Hierarchical Clustering and Tabu Search Algorithms. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.*

Barrick Gold Corporation (2015) Annual Information Form

Bastante, F., et al., (2004). *Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. Engineering Geology.*

Castro J., et al., (2010). *Probabilistic Risk Analysis of Mine Production Plans. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.*

Chinneck, J. (2015) *Practical Optimization a Gentle Introduction*, Systems and Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada

Dantzig (1963) *Linear Programming and extensions*, Princeton University Press.

Deloitte (2015) *Tendencias de 2015, los 10 principales desafíos que enfrentarán las compañías mineras el próximo año.* [En línea], recuperado el 21 de Marzo del 2017, de <http://www.deloitte.com/mining>

Eppen Gould (2000) *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa*, Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Estrella, Cesar (2017), *Operación minera de carguío y acarreo* [En línea], recuperado el 18 de Julio del 2017, de http://www.academia.edu/16481111/operacion_minera_de_carguio_y_acarreo.

Forest Resource Management (2011) Basic Linear Programming Concepts, pp 203-233.

Gupta, P. K., & Hira, D. S. (2011). *Operations research. New Delhi: S. Chand and Company Limited.*

Hillier and Lieberman (2010) *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9ª ed.), México: Mc Graw Hill.

Hustrulid, W. y Kuchta, M., (2006). *Open pit mine planning and design*. Taylor & Francis plc., London, UK.

INFOMINE (2016), *Dictionary of Mining and Mineral Terms*, [En línea], recuperado el 12

de Julio del 2017, de <http://www.infomine.com/dictionary/>

King, B., (2009). *Optimal Mining Principles. Orebody modelling and strategic mine planning*, Conference Proceedings, AusIMM.

Luke Evans L., Miranda H., Scholey B. (2015), *RPA Technical Report on the Lagunas Norte Mine, NI 43-101 Report*, Solid Resources Toronto, ON, Canada

Macassi Arturo (2006), *Mineralización Lagunas Norte, Lagunas Norte - Servicio Técnicos - Geología*

Morales, N. and Rubio, E., (2010). *Robust Open-Pit Planning under Geological Uncertainty*. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp534.

Prawda J. (2004) *Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones*, México: Limusa.

Rojas Mario T. (2006), *Presentación Clasificación de Materiales Lagunas Norte - Servicios Técnicos - Geología*.

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (2013), *Descripción de Procesos Mineros*, [En línea], recuperado el 21 de Julio del 2017, de <http://www.snmpe.org.pe>

Solver(2017) by Microsoft Corporation, [En línea], recuperado el 20 de Julio del 2017, de <https://support.office.com/en-us/article/Define-and-solve-a-problem-by-using-Solver-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c>

Taha H. (2012) *Investigación de Operaciones* (9ª ed.), México: Pearson.

US Bureau of Mines (2016), *National Minerals Information Center*, [En línea], recuperado el 1 de Julio del 2017, de <http://minerals.usgs.gov/minerals/>

Verma, A. (2010). *Operation research* (5th Edition). New Delhi: S. K. Kataria & Sons

Xu, H., et al., (2009). *Conditional Simulation of Grades Controlled by Geological Indicators. Orebody modelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.*

Agbadudu, A. B. (1996). *Elementary operations research (Volume I)*. Benin City: University of Benin Press.