

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

SECCION DE POST GRADO



**MODELOS DE OPTIMIZACION MATEMATICA PARA EL SISTEMA DE
SOPORTE DE DECISIONES EN EL PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO EN
UNA MINA A TAJO ABIERTO**

Por:

B.Sc. Edgard Gustavo Solis Vargas

**Tesis Presentada a la Sección de Post-Grado de la Facultad de Ingeniería Industrial y
de Sistemas, como uno de los requisitos para optar el grado de Maestro en Ciencias
con mención en Ingeniería de Sistemas**

Lima, 3 de Agosto de 2000

INDICE

CAPÍTULO 1

MARCO TEORICO

1.1.- LOS PROBLEMAS Y LAS ORGANIZACIONES	1
1.2.- MODELOS Y MODELADO	3
1.3.- UN LENGUAJE DE SISTEMAS	5
1.4.- CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS	5
1.5.- METODOLOGIA DE SISTEMAS USADO	7
1.6.- PROGRAMACIÓN LINEAL (PL)	9
1.6.1- Estructura De Un Modelo De Programación Lineal	11
1.7.- PROGRAMACION LINEAL ENTERA (PLE)	11
1.7.1- El Número de Variables en un Modelo PLE	12
1.8.- SISTEMAS DE INFORMACION	13
1.8.1. Categorías de Sistemas de Información	13
Sistemas Para el Procesamiento de Transacciones.	
Sistemas de Información Administrativa.	
Sistemas Para el Soporte de Decisiones (SSD).	
1.9.- SISTEMAS PARA EL SOPORTE DE DECISIONES	15
1.9.1. - Características de un SSD	
1.9.2. - El Estilo de Toma de Decisiones	
1.9.3. - Partes de un SSD	
1.10.- PLANIFICACION EMPRESARIAL	20
1.11.- CONCEPTOS ECONOMICOS	20

CAPITULO II

ANALISIS DEL SISTEMA: LA EMPRESA MINERA

2.1.- SITUACION ACTUAL DE LA MINERIA	22
2.2.- DEFINICION DEL SISTEMA: LA EMPRESA	26
2.3.- FORMULACION DEL PROBLEMA	34
2.4.- LOS OBJETIVOS DEL SISTEMA	35
2.5.- RECOPIACION DE INFORMACION	35

CAPITULO III

EL SISTEMA PARA EL SOPORTE DE DECISIONES (SSD)

3.1.	- EL SSD Y SUS CARACTERISTICAS	37
3.2.	- INTERFACE DEL SSD	38
3.3.	- EL SUBSISTEMA DE DATOS DE LA EMPRESA	41
3.4.	- ELSUBSISTEMADELOSMODELOS	42

CAPITULO IV

EL MODELO DE PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

4.1-	ANTECEDENTES	45
4.2-	CARACTERISTICAS GENERALES	46
4.3-	CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS GENERALES	52
4.4-	FORMULACION MATEMATICA	54
	4.4.1.- Notación usada:	54
5.1.	4.4.2.- la función objetivo	59
5.2.	4.4.3 - Las restricciones	59
4.5-	ALCANCES DEL MODELO DE PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO	74

CAPITULO V

IMPLEMENTACION DEL MODELO

5.3.	- LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO IMPLEMENTADOS	76
5.4.	- CANTIDADDEBANCOSYFASESPORMINACONSIDERADOS	77
5.5.	- INFORMACION GEOLOGICA, COSTOS Y PARAMETROS USADOS EN EL MODELO	78
5.6.	- CANTIDAD DE VARIABLES DEL MODELO	79
5.7.	- GENERACION DE ESCENARIOS	81

CAPITULO VI

RESULTADOS DEL MODELO

6.1.	- PRELIMINARES	83
6.2.	- ANAUSIS DE IX)S RESULTADOS	84
6.3.	- TIEMPO DE EJECUCION DE UOS MODELOS	90
6.4.	- VALIDACION DEL MODEIX)	91

CAPITULO VII

CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES	95
ANEXO I	96
ANEXO 2	97
BIBLIOGRAFIA	101
GLJOSARIO DE TERMINOS	103

DESCRIPTORES TEMATICOS

Sistema de Soporte de Decisiones

Planeamiento

Planeamiento minero

Optimización matemática

Minimizar costos

Mina a tajo abierto

RESUMEN

Se ha desarrollado un Sistema para el Soporte de Decisiones (SSD), en una empresa minera a tajo abierto, orientado a apoyar en la creación de los planes de producción e inversión a largo plazo, dicho SSD está compuesto por un subsistema de modelos, usados para generar los planes de producción e inversión, un subsistema de información para las operaciones transaccionales de la empresa y una interface de usuario final para el ingreso de parámetros, manejo del modelo y presentación de resultados. El componente principal en este conjunto es el de los modelos matemáticos para toma de decisiones.

Dichos modelos nos permiten decidir y evaluar en un horizonte de largo plazo, los cursos óptimos de acción para la programación de la producción, estimación de equipos y las inversiones necesarias, teniendo como objetivo global la minimización del Valor Actual Neto en función a costos. Esta herramienta nos permitirá hacer un análisis What If! para distintos planes de producción. Se trata de un modelo de Programación Matemática, que considera las metas anuales de producción para un horizonte dado, se tiene en cuenta los costos de producción e inversiones, así como también, el número de minas, el número de fases por mina, el número de bancos por fase, y las reservas y recursos de cada mina. Se considera una tasa de producción máxima variable por banco, la secuencia o ubicación de las fases, recuperación por mina distancias a los PADs (lugares donde se deposita el mineral para su tratamiento) y botaderos (lugares donde se deposita el material inservible), capacidad de PADs y Botaderos.

INTRODUCCION

El planeamiento a largo plazo, es una preocupación constante de las empresas, especialmente aquellas que tienen que coordinar una cantidad ingente de recursos tanto económicos, humanos y de equipos.

Se ha tratado de plasmar las ventajas competitivas que las empresas e instituciones pueden obtener al implementar los modelos matemáticos (en un entorno de fácil uso), como componente de los sistemas usados para el soporte de las decisiones.

El capítulo I, resume el marco teórico usado para el desarrollo de la tesis, en el cual encontraremos conceptos de sistemas, el enfoque adoptado y el método de programación matemática usado.

En el capítulo II, se analiza la empresa minera, en torno a la cual se desarrolló la tesis, identificando los componentes del sistema definido, el límite del mismo, los procesos que se llevan a cabo y las diversas relaciones existentes. La empresa explota una mina de oro a tajo abierto y está ubicada en el primer lugar de producción en el país y en América Latina; además ocupa uno de los primeros lugares de producción en el ámbito mundial.

En el capítulo III, se detalla la estructura del sistema para el soporte de decisiones: la interface, el subsistema de información de la empresa y el subsistema de modelos.

En el capítulo IV, describe la estructura de uno de los modelos que conforma el subsistema de modelos, el cual permite generar los planes de producción e inversión a largo plazo, así como, la interacción de este con la interface y el subsistema de datos de la empresa.

En el capítulo V, describimos la implementación del modelo, se detalla toda la información que el

modelo utiliza para poder crear los planes de producción, como por ejemplo, la cantidad de minas y bancos por cada mina, la información geológica de cada uno de los bancos y los costos asociados. También se analizan los factores que determinan la cantidad de variables y restricciones que el modelo utiliza y la generación de escenarios.

El capítulo VI describe los resultados obtenidos al ejecutar el modelo de planeamiento, compara las soluciones del planeamiento tradicional y las obtenidas usando el programa matemático, además se indican los tiempos de ejecución del modelo.

En el capítulo VII tenemos las conclusiones y recomendaciones obtenidas como resultado de la utilización del SSD.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

11- LOS PROBLEMAS Y LAS ORGANIZACIONES

Es útil examinar con brevedad la naturaleza de los problemas en las diversas organizaciones. Esto ayudará a explicar la visión, tomada después, de la naturaleza de los problemas, en el espectro de problemas y sus relaciones con las metodologías particulares usadas en su análisis. Puede inferirse una amplia clasificación de los tipos de problemas, tomando los extremos de un espectro que se extiende desde lo "duro" a lo "suave" y considerando la distinción entre preguntas respecto a cómo debe ser emprendida una actividad y lo que la actividad es. En este contexto, el problema bien definido de una llanta agujereada es un problema duro; por otra parte, la situación del terrorismo es extremadamente suave.

Un problema "duro" o estructurado, es el que se relaciona de manera exclusiva con situaciones donde se pregunta "cómo". Esto puede ejemplificarse con el problema que encara un gerente cuando tiene la necesidad de expandir su empresa el problema es cómo hacerlo. Esta clase de problemas son del dominio de la ingeniería del diseño, donde se buscan respuestas efectivas y económicas cuando se pregunta "cómo".

Un problema "suave" o no estructurado se tipifica por combinaciones de preguntas "que" y "como". En el área de producción, por ejemplo, un administrador puede enfrentar el problema de cómo mejorar la producción. Esta declaración del problema no ofrece una guía de qué debe investigar para identificar las áreas de mejora potencial ni de cómo podría entonces introducir un cambio para realizar la mejora. En el nivel de lo que necesita hacer, podría:

- Mejorar la materia prima para la conversión del producto.
- Mejorar el mantenimiento de la planta.
- Rediseñar los requerimientos de producción y planear métodos.
- Mejorar la mercadotecnia mediante enlaces en la producción.

Habiendo decidido en una o más de las áreas anteriores, entonces tiene que determinar cómo efectuar la mejora deseada. Este ejemplo es típico de los problemas de “administración” y, por tanto, cualquier metodología que se proponga ayudar a los administradores a enfrentar problemas, necesita ser capaz de estructurar los problemas; por ejemplo, convertir problemas en que se pregunta “que” y “como”, en problemas sólo de “cómo”.

Brian Wilson (1) encuentra el concepto de “problema” como inadecuado. La noción de que un problema puede definirse sugiere que puede encontrarse una solución para eliminarlo. Esta no es irrazonable en el extremo “duro” del espectro de problemas, pero en el extremo “suave” los problemas no ocurren de manera que puedan aislarse con rapidez. Es más común encontrar grupos de problemas muy interactivos y ha resultado más útil examinar, no un problema sino una situación problema; por ejemplo una situación donde se perciben problemas.

Las maneras de describir las situaciones problema (lenguajes de modelados) necesitan ser adecuadas a la naturaleza del problema bajo investigación. Como la distinción “duro” / “suave” se refiere a los extremos de un espectro de problemas posibles, los lenguajes de modelado pueden también ser enfocados con relación a estos extremos.

Las matemáticas proporcionan un lenguaje general que ha sido aplicado con amplitud a los problemas “duros”. Se ha encontrado que son útiles las construcciones abstractas de cálculo y estadística, cuando puede asumirse que los elementos de la situación se comportarán de acuerdo con las leyes físicas. Cuando los elementos de un problema “suave” incluyen características tales como objetivos contradictorios, flujos de información poco claros o complejos, personas con diferentes percepciones y aptitudes, etc., es difícil considerar adecuado un lenguaje basado en las matemáticas.

1.2. - MODELOS Y MODELADO

El modelado o la habilidad de describir la situación que afronta el analista, es crucial a la aplicación posterior de alguna metodología para analizar esa situación. El modelado es algo que nosotros hacemos, ya sea como actividad consciente o inconsciente. Antecede a cada decisión en la que tendrá que hacerse alguna valoración de los resultados, sin importar si se hace de manera superficial. La declaración acerca de que la conducción de una junta fue mala, se basa en un modelo implícito de lo que es una buena reunión. Un analista que visita una industria por primera vez y observa que el proceso de producción planeado podría ser mejorado, en forma similar, basa esta opinión en algún modelo implícito de producción planeada. En este último caso, antes de decidir qué hacer, es probable que se elabore un modelo explícito.

A continuación damos una definición de modelo dada por Brian Wilson:

Un modelo es la interpretación explícita de lo que uno entiende de una situación, o tan sólo de las ideas de uno acerca de esa situación. Puede expresarse en matemáticas, símbolos o palabras, pero en esencia es una descripción de entidades, procesos o atributos y las relaciones entre ellos. Puede ser prescriptivo o ilustrativo f pero, sobre todo, debe ser útil.

Esto es muy amplio, pero necesita ser así, dada la complejidad de las situaciones de la administración, que son el contexto en que deseamos considerar el modelado. El hecho de que esté en términos de interpretaciones o ideas acerca de una situación proporciona la libertad de modelar cualquier cosa que se considera relevante a la situación antes que un modelo de la situación misma. La última afirmación de la definición se inserta para enfatizar la advertencia dada antes, por ejemplo, que el modelo es sólo parte de un proceso de análisis y no el resultado.

Para ilustrar las clases de modelos, los lenguajes de modelos y los propósitos para los que son adecuados, puede generarse una clasificación. Ackoff^T hace distinción entre las formas de modelos.

Icónico.

Esto implica que el modelo es una versión en miniatura (aunque algunas veces es una ampliación) del objeto real y las propiedades relevantes del objeto real se representan por medio de las propiedades mismas pero, por lo general, con un cambio de escala. Así se construye una réplica con la que se espera reproducir el comportamiento del original, de manera bastante confiable.

Analógico.

Puede construirse un modelo de aspecto físico bastante diferente que, sin embargo, se espera reproduzca el comportamiento representativo

Analítico.

Las relaciones matemáticas o lógicas pueden desarrollarse de manera que representen las leyes físicas que rigen la conducta de la situación bajo investigación. Dicho desarrollo, por lo regular, precederá a un modelo analógico.

Conceptual.

Aunque las clasificaciones anteriores proporcionan una distinción útil, sólo cubre modelos de forma física o que pueden controlarse de forma cuantitativa. A estas tres formas Brian Wilson les añade la categoría posterior de modelos conceptuales. Estos incluyen los modelos pictográficos o simbólicos, en referencia a la definición, que cubre los aspectos cualitativos de la situación. De hecho, el modelo conceptual que puede construirse puede preceder a cualquiera de las otras clases de modelado, y seguir siendo una forma de modelado por derecho propio.

13.- UN LENGUAJE DE SISTEMAS

Desde los inicios de la Segunda Guerra Mundial, las metodologías de la ingeniería de diseño se han desarrollado para enfrentarse a la necesidad de diseñar procesos que se vuelven cada vez más complejos y costosos. Los ambientes del mercado en los que las compañías estaban operando se volvieron más competitivos y, por tanto, los procesos usados para manufacturar productos en estos mercados se han diseñado y operado para ser muy eficientes. Junto a esta tendencia, los desarrollos computacionales fueron incrementando la factibilidad de llevar a cabo los cálculos completos requeridos para alcanzar esta mayor eficiencia. Esta situación dio lugar al surgimiento de las metodologías de la ingeniería de sistemas en las que se intentó integrar los efectos de interacciones entre las unidades mismas del proceso, el proceso que se diseñaba, el conjunto de procesos que interactuaban y el ambiente del mercado que atendían. Así, al desarrollar estas ideas, los analistas estaban buscando tomar más del todo; esto es, el límite del sistema analizado se amplió.

1.4. - CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS

La palabra "sistema" tiene muchas interpretaciones, dependiendo del contexto en el que se usa. Puede significar, por ejemplo, un procedimiento, un proceso o su control, una red o un paquete de procesamiento de datos basados en la computadora. Aunque todas son formas válidas de utilizar la palabra, es necesaria una definición que permita que una interpretación particular sea puesta en contexto. Esto es muy necesario aquí, si estamos usando el concepto de sistema como base para un lenguaje de modelado.

Un útil punto de inicio para llegar a una definición precisa es tomar una definición general que incluya todas las interpretaciones mencionadas arriba, esto es, la definición del diccionario: "un sistema es un conjunto estructurado de objetos y (o) atributos junto con las relaciones entre ellos".

Como puede verse, en principio, el sistema es un conjunto: esto es, contiene elementos que tienen alguna razón para que se consideren juntos, por encima de otras razones. Pero es más que un simple conjunto, también contiene las relaciones que existen entre sus elementos. De manera que si el sistema es un paquete computacional, los elementos serán las instrucciones y las relaciones se definirán con la estructura particular del programa. Si el sistema es un ser humano, los elementos podrían ser el corazón, pulmón, cerebro, etc., y las relaciones se determinarían con las funciones particulares de los sistemas nervioso, hormonal, etc.

Esta definición general, aunque proporciona un modelo de referencia global en el que pueden ubicarse todas las interpretaciones, no es bastante buena para usarse como un lenguaje de modelado.

La definición puede refinarse primero derivando una clasificación en términos de tipos de sistemas.

Sistemas Naturales.

Sistemas físicos que integran el universo, en una jerarquía de sistemas subatómicos desde los sistemas de ecología hasta los sistemas galácticos.

Sistemas Diseñados.

Estos pueden ser tanto físicos (herramientas, puentes, complejos automatizados) como abstractos (matemáticas, lenguaje, filosofía).

Sistemas de Actividad Humana.

Por lo general, describen los seres humanos que emprenden una actividad determinada, como los sistemas hombre-máquina, la actividad industrial, los sistemas políticos, etc.

Sistemas Sociales y Culturales.

La mayor parte de la actividad humana existirá en un sistema social donde los elementos serán seres humanos y las relaciones serán interpersonales. Este es diferente por naturaleza a las otras tres clases, que abarcan la interfaz entre los sistemas de actividad natural y humana. Ejemplos de sistemas sociales pueden ser la familia o la comunidad, al igual que el conjunto de sistemas formados por seres humanos agrupados para desempeñar alguna actividad determinada, como la preocupación por una excesiva industrialización, una sociedad coral o una conferencia.

I.5. - METODOLOGIA DE SISTEMAS USADO

La palabra problema se ha descrito antes en términos de su relación con extremos de un espectro que se extiende desde lo "duro" hasta lo "suave*", donde los problemas duros se relacionan solo con situaciones en las que se pregunta "como" y los problemas suaves son combinaciones complejas con situaciones en que se pregunta "que" y "como". Esta distinción es útil todavía, pero, al discutir la metodología, se usa una definición más general. Se toma en cuenta que un "problema" es una expresión de preocupación por una situación. En este contexto la metodología representa un conjunto estructurado de guías que permiten a un analista inferir maneras de aliviar esa preocupación. La metodología no es un método o técnica. Necesita ser más flexible que cualquiera de ellos en términos de su estructura y su aplicación, si va a ser adecuada a las diferentes preocupaciones que existen en el mundo real. Una técnica se caracteriza mediante guías definidas con precisión, de manera que si el problema es, digamos, resolver una ecuación diferencial, existen técnicas disponibles que utilizan los operadores clásicos o los operadores de Laplace que, si se aplican en forma correcta, conducirán a una solución con la que cualquier analista competente convendrá que es correcta. No obstante, una situación así se relaciona solo con una pequeña parte de las preocupaciones del mundo real en general. La aplicación de una metodología puede involucrar el uso de técnicas, pero es la metodología la que determina si una técnica particular es adecuada o no.

El grado de precisión en las guías de una técnica es lo que convierte su contabilidad en un planteamiento inadecuado, como vehículo para resolver problemas del mundo real. Estar “orientado a la técnica” es introducir el peligro de que esa situación problema se distorsione para ajustarse a la técnica. Es un peligro en el sentido que, aunque se garantiza una solución, la solución podría no eliminar en realidad las preocupaciones iniciales. Un enfoque más exitoso es el estar orientado al problema y permitir que la situación distorsione la manera en que el análisis se está realizando. Esta orientación demanda flexibilidad en el enfoque; por esa razón, se hace énfasis en la metodología y no en la técnica.

La metodología de Ingeniería de Sistemas usada en el presente trabajo para el subsistema de modelos está basada en el enfoque particular de Gwilym Jenkins (I) (Universidad de Lancaster), usando la metodología de ingeniería de sistemas duros, que tiene las siguientes etapas:

1. Análisis de los sistemas

Etapa desarrollada en el capítulo II, el sistema en cuestión es una empresa minera dedicada a la explotación de oro, esta etapa es crítica pues, hay que formular el o los problemas y determinar los objetivos del sistema, lo cual involucra un conocimiento detallado de las actividades del sistema. Implica las siguientes tareas:

- Definición del sistema
- Formulación del problema
- Organización del proyecto
- Objetivos del sistema
- Definición de criterios económicos
- Recopilación de información y datos

2. Diseño y construcción de sistemas

Esta etapa es desarrollada en el capítulo IV, e implica el diseño y construcción de los modelos matemáticos, utilizando la programación lineal entera mixta, conocer el proceso de extracción de mineral y las reglas de decisión usadas por los ingenieros de planeamiento y las restricciones de recursos y de infraestructura existentes. Una vez construidos los modelos, se realizan las primeras pruebas piloto con información real hasta obtener los

resultados deseados. Se desarrollan las siguientes tareas:

- Construcción de modelos
- Optimización y/o simulación
- Pruebas piloto Control

3. Implementación y Operación

La implementación es la labor más delicada, pues en esta etapa el usuario debe percibir la facilidad de uso y utilidad de la herramienta desarrollada. Los primeros resultados son minuciosamente analizados

La operación inicial, retroalimentación y operación mejorada tienen que ver con la utilización de los resultados obtenidos usando los modelos matemáticos. Esta etapa es desarrollada en los capítulos V y VI, comprende las siguientes tareas:

- Documentación
- Capacitación
- Operación inicial
- Retroalimentación
- Operación mejorada

1.6. - PROGRAMACIÓN LINEAL (PL)

Muchas personas consideran el desarrollo de la programación lineal como uno de los avances científicos más importantes de mediados del siglo XX, puesto que su impacto desde 1950 a la fecha ha sido extraordinario. En la actualidad es una herramienta común que ha ahorrado miles de millones de dólares a muchas compañías y negocios, incluyendo industrias medianas en distintos países del mundo; su aplicación a otros sectores de la sociedad se está ampliando con rapidez. De hecho, una proporción muy grande de los cálculos científicos en computadoras está dedicado al uso de la programación lineal y las técnicas relacionadas con ésta.

En forma breve, el tipo más común de aplicación abarca el problema general de asignar recursos limitados entre actividades competitivas de la mejor manera posible (es decir, en forma óptima). Este problema de asignación puede surgir cuando debe elegirse el nivel de ciertas actividades que compiten por recursos escasos necesarios para realizarlas. La variedad de situaciones a las que se puede aplicar esta descripción es muy grande, desde la asignación de instalaciones productivas a los productos, hasta la asignación de los recursos nacionales a las necesidades de un país, desde la selección de una cartera de inversiones, hasta la selección de los patrones de envío, desde la planeación agrícola, hasta el diseño de una terapia de radiación, etc. No obstante, el ingrediente común de todas estas situaciones es la necesidad de asignar recursos limitados a las actividades de la mejor manera.

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir el problema. La palabra lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser funciones lineales. En este caso, la palabra programación no se refiere a programación en computadoras; en esencia es un sinónimo de planeación. Así, la programación lineal trata sobre la planeación de las actividades para obtener un resultado óptimo, esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada (según el modelo) entre todas las opciones de solución.

Aunque la asignación de recursos a las actividades es la aplicación más frecuente, la programación lineal tiene muchas otras posibilidades. De hecho, cualquier problema cuyo modelo matemático se ajuste al formato general del modelo de programación lineal es un problema de programación lineal.

1.6.1.- Estructura De Un Modelo De Programación Lineal

Un problema de programación lineal (PL) es aquel que tiene la siguiente estructura:

$$\text{MAX } C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad \text{Función Objetivo}$$

s.a.

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n \leq b_1 \quad \text{Restricciones}$$

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

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n \leq b_m$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0 \quad \text{Condición de no negatividad}$$

Donde X_i , son denominadas variables de decisión del modelo

A_{ij} , son denominados coeficientes.

La estructura anterior puede tener algunos cambios como:

- MIN por MAX en la función objetivo.
- Las restricciones pueden ser \leq , \geq ó $=$.
- Pueden existir variables $X_j \leq 0$ ó X_j no restringidas en signo

1.7.- PROGRAMACION LINEAL ENTERA (PLE)

Una sorprendente variedad de problemas pueden ser modelados usando variables enteras, restricciones y función objetivo lineales. Algunas veces, tales modelos consisten solamente de variables enteras, estos son los modelos de programación lineal entera pura (PLE). Mas comúnmente, se encuentran presentes tanto las variables convencionales continuas como las variables enteras, tales modelos son

llamados modelos de programación lineal entera mixta (PLEM), el anexo II contiene una explicación del proceso de solución de un problema PLE.

Un modelo de programación lineal entera, es aquel que tiene la misma estructura que un modelo de programación lineal, excepto que las variables deben tomar valores enteros. La cantidad de variables definidas en un modelo de PLE es un factor crítico al resolver el problema formulado, es conveniente analizar la manera, como afecta esta cantidad de variables en el desempeño de los métodos de solución.

1.7.1. - El Número de Variables en un Modelo PLE

Centraremos nuestra atención en el número de variables enteras en un modelo IP, dado que frecuentemente este es un buen indicador de dificultad computacional (Ver el anexo II).

Si se tiene un modelo lineal con n variables binarias, esto es, que solo pueden valer 0 ó 1, esto, podría indicarnos 2^n posibles valores para las variables y desde que tenemos 2^o nodos potenciales en el árbol de soluciones (Ver el anexo 11 para más detalles acerca del árbol de soluciones, el cual implica la existencia de diferentes ramificaciones o alternativas a evaluar, a medida que las diferentes variables binarias toman valores cero o uno), el total serán 2^o -1 nodos en tal árbol. Uno podría esperar, por lo tanto que el tiempo de solución crezca exponencial mente con el número de variables 0-1. Para valores modestos de n , 2^o es muy grande. Esta situación no es, por supuesto, tan mala, desde que los 2^o nodos potenciales nunca serán examinados, las reglas del método de ramificación y acotamiento (Branch and Bound) eliminarán una gran cantidad de nodos del árbol potencial para su evaluación, a medida que estas sean infactibles o peores que la solución actualmente conocida. Es bueno considerar el hecho de que algunas veces uno puede resolver problemas PLE de 100 variables 0-1 en unos cuantos cientos de nodos. Esto representa solo cerca del 0.00...01 por ciento del total potencial, donde hay 28 ceros después del punto decimal. En vista de esta eficiencia muy sorprendente que el método "Branch and Bound" muestra sobre el

total potencial de cálculos, el número de variables 0-1, frecuentemente es un pobre indicador de la dificultad de un modelo PLE.

Sin embargo, hay circunstancias en las que el número de las variables 0-1, puede ser incrementado para obtener un buen efecto.

1.8. - SISTEMAS DE INFORMACION

Las finalidades de los sistemas de información, como las de cualquier otro sistema dentro de una organización, son procesar entradas, mantener archivos de datos relacionados con la organización y producir información, reportes y otras salidas.

Los sistemas de información están formados por subsistemas que incluyen hardware, software, medios de almacenamiento de datos para archivos y bases de datos. Un conjunto particular de subsistemas utilizados - equipo específico, programas, archivos y procedimientos - es lo que se denomina una aplicación de sistemas de información. De esta forma, los sistemas de información pueden tener aplicaciones en ventas, contabilidad o compras entre otras.

Dado que los sistemas de información dan soporte a los demás sistemas de la organización, los analistas tienen primero que estudiar el sistema organizacional como un todo para entonces detallar sus sistemas de información. Los organigramas se emplean, con frecuencia, para describir la forma en que están relacionados los diferentes componentes de la organización, tales como divisiones, departamentos, oficinas y empleados. Aunque los organigramas indican con precisión las relaciones formales entre los diferentes componentes no dicen nada con respecto a la forma en que opera el sistema organizacional; ya que en este tipo de diagramas no es posible plasmar todos los detalles importantes.

1.8.1. - Categorías De Sistemas De Información

El analista de sistemas desarrolla diferentes tipos de sistemas de información para satisfacer las diversas necesidades de una empresa.

Sistemas Para el Procesamiento de Transacciones.

Uno de los sistemas, basado en computadora más importante dentro de una organización es el que está relacionado con el procesamiento de las transacciones. Los sistemas de procesamiento de transacciones (SPT) tienen como finalidad mejorar las actividades rutinarias de una empresa y de las que depende toda la organización. Una transacción es cualquier suceso o actividad que afecta a toda la organización. Las transacciones más comunes incluyen: facturación, entrega de mercancía, pago de planillas y depósito de cheques. Los tipos de transacciones cambian en cada una de las diferentes organizaciones. Sin embargo, la mayor parte de las compañías procesan dichas transacciones como una mayor parte de sus actividades cotidianas. Las empresas con mayor éxito llevan a cabo este trabajo en forma ordenada y eficiente.

Sistemas de Información Administrativa.

Los sistemas de transacciones están orientados hacia operaciones. En contraste, los sistemas de información administrativa (SIA) ayudan a los directivos a tomar decisiones y resolver problemas. Los directivos recurren a los datos almacenados como consecuencia del procesamiento de las transacciones, pero también emplean otra información

En cualquier organización se deben tomar decisiones sobre muchos asuntos que se presentan con regularidad (cada semana, mes, trimestre, etc.) y para hacerlo se requiere de cierta información. Dado que los procesos de decisión están claramente definidos, entonces se puede identificar la información necesaria para formular las decisiones. Se pueden desarrollar sistemas de información para que, en forma periódica, preparen reportes para el soporte de decisiones. Cada vez que se necesita la información, esta se prepara y presenta en una forma y formato diseñados con anterioridad.

Con frecuencia, los especialistas en sistemas de información describen las decisiones apoyadas por estos sistemas como decisiones estructuradas. El aspecto estructurado se refiere al hecho de que los administradores conozcan de antemano los factores que deben tenerse en cuenta para la toma de decisiones así como las variables con influencia más significativa sobre el resultado de una decisión (buena o mala). A su vez, los analistas de sistemas desarrollan reportes bien estructurados que contienen la información necesaria para las decisiones o que indican el estado de las variables importantes.

Sistemas Para el Soporte de Decisiones (SSD).

No todas las decisiones son de naturaleza recurrente. Algunas se presentan solo una vez o escasamente. Los sistemas para el soporte de decisiones (SSD) ayudan a los directivos que deben tomar decisiones no muy estructuradas, también denominadas no estructuradas o decisiones semi-estructuradas. Una decisión se considera no estructurada si no existen procedimientos claros para tomarla y tampoco es posible identificar, con anticipación, todos los factores que deben considerarse en la decisión.

Un factor clave en el uso de estos sistemas es determinar la información necesaria, en situaciones bien estructuradas es posible identificar esta información con anticipación, pero en un ambiente no estructurado resulta difícil hacerlo. El criterio de los directivos tiene un papel importante en la toma de decisiones donde el problema no es estructurado. Los sistemas para el soporte de decisiones ayudan pero no reemplazan el criterio del directivo.

1.9. - SISTEMÁS PARA EL SOPORTE DE DECISIONES (SSD)

Los SSD, tienen muchas características que los hacen diferentes de otros sistemas más tradicionales de manejo de la información. Los usuarios finales de los SSD, por las características del tipo de problemas que enfrentan y por el aprendizaje que requieren, también poseen ciertas características especiales que deben considerarse.

1.9.1.- Características de un SSD

Un SSD, es un instrumento que sirve para organizar la información que eventual mente se usará en la toma de decisiones. Involucra el uso de una base de datos para un propósito específico de toma de decisiones. Un SSD, no solo

automatiza las transformaciones de los datos, ni simplemente proporciona una salida en forma de reporte: más bien, el DSS apoya el proceso de toma de decisiones mediante la presentación de la información deseada, para el alcance de la solución de los problemas de toma de decisiones y de sus necesidades de aplicación. Tampoco reemplaza el juicio del usuario, ni llegará a tomar las decisiones por él (10).

Un SSD, puede construirse para apoyar decisiones que se toman una sola vez, o aquellas que son poco frecuentes, o bien aquellas que ocurren de manera rutinaria. Sin embargo, el tipo de problema o de oportunidad que mejor enfrenta un SSD es aquél que requiere del juicio humano.

1.92.- El Estilo de Toma de Decisiones

La forma de recopilar, procesar y utilizar la información define los parámetros del estilo de toma de decisiones, además de la manera como se comunican y toman las decisiones. Es común que los tomadores de decisiones se caractericen por ser analíticos o heurísticos (10).

La toma de decisiones analítica

El tomador de decisiones analítico se basa en la información que adquiere y evalúa, de manera sistemática para reducir alternativas y elegir con base en tal información. Como se muestra en el gráfico inferior, el tomador de decisiones analítico aprende a analizar situaciones particulares. Los tomadores de decisiones analíticos, evalúan la información cuantitativa, así como los modelos que la generan y usan.

Tipos de tomadores de decisión

Analítico	Heurístico
<ul style="list-style-type: none"> • Aprende mediante el análisis • Usa procedimientos paso por paso • Evalúa información cuantitativa y modelos • Construye modelos matemáticos y algoritmos • Busca la solución óptima 	<ul style="list-style-type: none"> • Aprende mediante la acción • Se vale de la prueba y el error • Aprecia la experiencia • Confía en el sentido común • Busca soluciones satisfactorias

Fuente: Kendall y Kendall

Además, quienes toman decisiones según un estilo analítico hacen uso de las matemáticas para modelar los problemas, y de los algoritmos para resolverlos. El tomador de decisiones analítico, busca soluciones óptimas más que satisfactorias (aquellas que satisfacen el mayor número de requisitos). El tomador de decisiones analítico hace uso de técnicas de decisión tales como gráficas, modelos probabilísticos y otras técnicas matemáticas para asegurar una toma de decisiones sólida. Sin embargo, estos métodos requieren que la información sea: disponible, razonable, completa y precisa.

Un ejemplo del tomador de decisiones analítico es aquel gerente que al enfrentarse a un problema desea emplear un modelo de gerencia computarizado para solucionar conflictos de manera óptima. Para ello, el gerente debe establecer una función objetivo y sus restricciones, construir las relaciones matemáticas pertinentes, recopilar información para el modelo y obtener la solución del problema.

La toma de decisiones heurística

El individuo que utiliza la heurística, decide con la ayuda de ciertos lineamientos (o reglas establecidas por la práctica), aunque éstos no se apliquen de manera consistente o sistemática. La heurística en términos generales se basa en la experiencia.

En consecuencia, los tomadores de decisiones analíticos son sistemáticos en la evaluación de alternativas de una decisión determinada. Por lo tanto, un SSD para un individuo analítico debe incluir diversos modelos gráficos y matemáticos que permitan el análisis deseado. También es importante poder contar con argumentos de apoyo para las alternativas que presenta el SSD.

Quienes abordan la toma de decisiones con un enfoque heurístico son apenas algo sistemáticos, pero utilizan reglas prácticas como lineamientos, más que el razonamiento cuidadoso de cada alternativa, cada vez que se presenta, por lo tanto, un SSD es normalmente utilizado y valorado por un gerente que tenga un perfil más analítico.

1.9.3.- Partes de un SSD

Un SSD, está compuesto de tres partes (Gráfico I):

- Mecanismo de interface.
- Subsistema de datos y
- Subsistema de modelos

Interface

Proporciona una manera para que el usuario pueda interactuar con el sistema. Una de las formas más sencillas de interface está representada por las filas y columnas de una hoja de cálculo. Este es el vehículo para alimentar los datos y determinar las características de un modelo. Otros sistemas de apoyo de decisiones utilizan una estructura más rigurosa de órdenes. Básicamente, el usuario debe ensamblar un programa de cómputo consistente en comandos e instrucciones que describen el modelo y especifican el proceso. Dependiendo del sistema, los comandos pueden ser dados en un lenguaje de procedimientos o en un lenguaje de alto nivel de cuarta generación. Para la salida o resultados del sistema, las capacidades de interface pueden incluir los dispositivos de visualización e impresión. La posibilidad de graficar, con frecuencia a todo color, realiza aún más el método de presentar la información al usuario.

Subsistema de modelos

Los modelos pueden ser descritos utilizando un lenguaje diseñado especialmente, donde las variables deben ser identificadas e interrelacionadas mediante fórmulas y procedimientos escritos previamente.

El subsistema del modelo también proporciona la capacidad para almacenar y recuperar modelos. Una base de datos de modelos, con frecuencia denominada "banco de modelos", los almacena.

Subsistema de datos

Incluye los medios para recuperar y procesar los datos que se encuentran en las bases de datos formales, así como, las herramientas para administrarlos. Algunos de los

datos necesarios son resultados del procesamiento de transacciones. Otros datos originados externamente, tal vez describan actividades de la competencia, consideraciones económicas o la proyección futura de una industria en particular. En el gráfico 1 se muestran las partes del SSD.

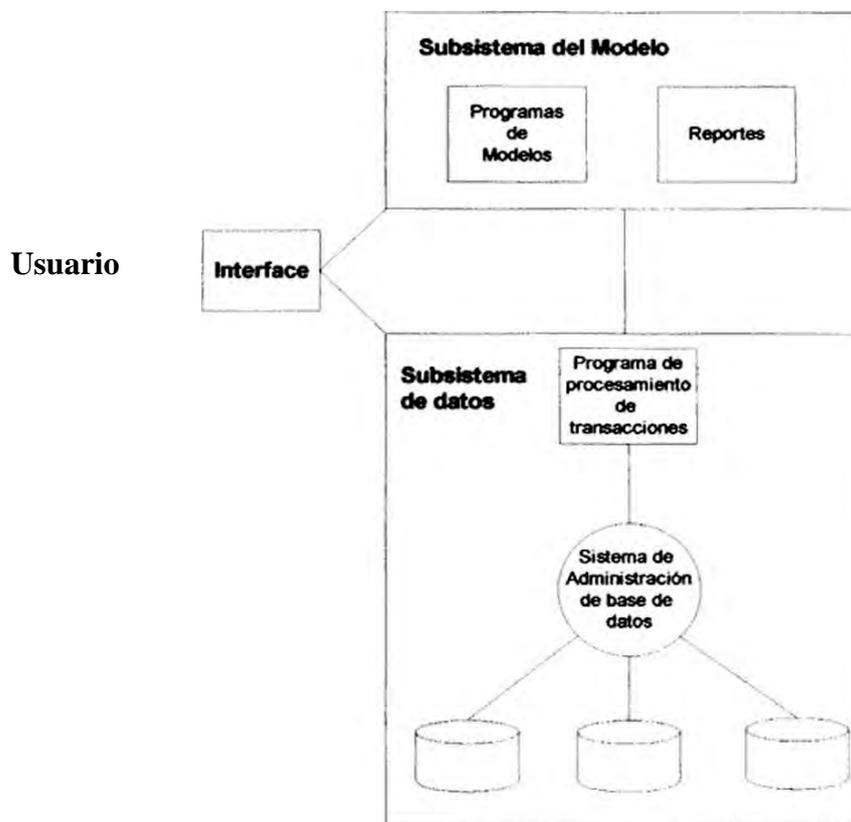


Gráfico 1 - Elementos de un SSD

1.10. - PLANIFICACION EMPRESARIAL

Al hablar de planificación algunos autores consideran tres etapas básicas, las cuales comentamos a continuación (9):

La Planificación Estratégica.

En la que se establecen los objetivos, las estrategias y, en general, los planes globales a largo plazo (cinco años, por ejemplo). Esta actividad es desarrollada por la alta dirección y se ocupa de problemas de gran amplitud, tanto en términos de actividades organizativas como de tiempos; debido a ello se emplean variables muy agregadas.

La Planificación Operativa.

Donde se concentran los planes estratégicos y los objetivos globales de la empresa para cada una de las áreas y subáreas funcionales, llegando a un elevado grado de detalle. Así se establecen, además, las tareas a desarrollar para que se cumplan los objetivos y planes a largo plazo, indicando dónde, cómo y cuándo se llevarán a cabo. Se trata, pues, de una etapa en la que las actividades son más limitadas y abarcan un horizonte temporal relativamente corto, que puede ir de 18 meses o un año a varias semanas, dependiendo de cada caso concreto; en consecuencia, las variables que aquí se emplean estarán más desagregadas.

La Planificación Adaptativa.

Que pretende establecer las medidas correctoras necesarias para eliminar las posibles divergencias entre los resultados y los objetivos relacionados con ellos.

1.11. - CONCEPTOS ECONOMICOS

Dependiendo de la manera como se compare los costos con los beneficios, puede obtenerse diversos coeficientes o magnitudes, cada uno de los cuales indicara algún aspecto del valor del proyecto, uno de ellos es el Valor Actual Neto (VAN).

Valor Actual Neto (VAN).

Llamado también Valor Presente Neto (VPN), es la suma algebraica de los valores actualizados de los costos y beneficios generados por el proyecto durante su horizonte de evaluación (3).

La Tasa de Actualización.

Llamada también "tasa de descuento" es un parámetro cuyo valor numérico debe ser tal que al utilizarlo para actualizar los flujos del proyecto, el VAN resulte positivo si la aceptación de la inversión conviene al inversionista porque aumenta sus beneficios netos; negativo si no le conviene, por la razón contraria; e igual a cero si le es indiferente aceptarla o no.

CAPITULO II

ANALISIS DEL SISTEMA: LA EMPRESA MINERA

De acuerdo a la descripción dada en el capítulo anterior, la primera etapa de de la metodología de la ingeniería de sistemas es el análisis de los sistemas, el cual será desarrollado en este capítulo.

El tema de tesis fue desarrollado en tomo a una empresa minera dedicada a la extracción, procesamiento y comercialización de oro, sin que esto sea un impedimento para la adaptación de los resultados obtenidos en otras minas que trabajen con minerales distintos.

2.1. - SITUACIÓN ACTUAL DE LA MINERIA

El Perú es un país rico en recursos minerales. Desde la época pre-hispánica hasta nuestros días, la explotación y elaboración de sus recursos mineros han constituido una actividad económica de suma importancia, que ha forjado un sector empresarial, recursos humanos, industrias y servicios conexos, altamente calificados y especializados, los que otorgan a nuestro país la competitividad necesaria para desarrollarse en este campo vigorosamente.

Las características del sector, aunadas a las medidas gubernamentales de los últimos años para lograr estabilidad económica, un clima de paz social, libertad económica, comercial, de promoción de la inversión y la privatización total de proyectos y operaciones mineras del estado, han permitido que la industria recobre su importancia en el desarrollo nacional.

Al presente, muchas empresas nacionales y extranjeras se encuentran en un proceso acelerado de ampliación y apertura de nuevos establecimientos, a las cuales se han sumado importantes consorcios mineros internacionales que se encuentran reconociendo el potencial y las oportunidades de inversión minera que existen en el Perú.

La industria minera en sus actividades de exploración, explotación y beneficio de minerales, requiere, como pocas actividades productivas, la participación de múltiples recursos y servicios humanos, financieros, industriales y técnicos. Esta propicia además, mediante la transformación de sus productos, la generación de industrias y servicios "down stream", todo lo cual contribuye a movilizar la economía del país. De esta manera la minería ayuda a elevar el nivel de vida de millones de seres humanos.

La tabla 1 mostrada abajo, nos da una idea del posicionamiento internacional de los productos peruanos mineros, además ponemos un especial interés en el caso específico del oro, debido a que el tema de tesis fue desarrollado en tomo a una empresa minera dedicada a la extracción, procesamiento y comercialización de dicho mineral.

Posición internacional de los productos peruanos mineros

	Es d mundo	En Latino América
Bismuto	2 do.	1 ro.
Plata	2 do.	2 do.
Estaño	3 ro.	2 do.
Telurio	3 ro.	1 ro.
Plomo	4 to.	1 ro.
Zinc	4 to.	1 ro.
Cobre	5 to.	2 do.
Molibdeno	6 to.	2 do.
Tungsteno	6 to.	2 do.
Arsénico	8 vo.	2 do.
Oro	9 no.	1 ro.
Cadmio	10 mo.	1 ro.

Tabla 1

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM)

El ORO

Descripción

El oro, metal conocido y usado desde la antigüedad en el Perú, generalmente se encuentra asociado a minerales de plata y cobre en yacimientos primarios, en forma de vetas y diseminados en yacimientos polimetálicos de plomo (Pb) y zinc (Zn), en yacimientos aluviales (secundarios) en la zona norte y sur oriental del país y en yacimientos diseminados de origen volcánico de baja ley.

Obtención del Oro.

Cuando el oro se encuentra en estado libre y la plata que normalmente lo acompaña como cloruro, sulfuro o en estado natural, el proceso comienza con la acumulación del mineral en pitas o rumas, donde es regada con cianuro de sodio, que al cabo de cierto tiempo disuelve el oro y la plata. La solución rica se capta en una poza que es bombeada a la planta de tratamiento, en la que es clarificada y desoxigenada, para luego pasar a la precipitación con polvo de zinc por el sistema Merrill-Crowe. El precipitado contiene todo el oro, la plata y el cobre si lo hubiere; se funde primero en un régulo de doré, que es como se llama esta aleación impura y luego se refunde en lingotes que se envían a refinar o a vender.

Usos del Oro

Por sus propiedades de resistencia a la corrosión, conductividad, maleabilidad, ductilidad y reflectividad es empleado, principalmente, en joyería, medicina (odontología), electrónica, computadoras y como respaldo financiero de los bancos.

Beneficios a la comunidad

La minera es una actividad creadora, que, en la búsqueda, extracción y procesamiento de los minerales, ha necesitado de todo el ingenio y creatividad del hombre para transformar y utilizar los recursos que nos brinda la naturaleza, satisfaciendo así nuestras necesidades con bienes que resultan imprescindibles para la vida diaria.

En nuestro país, la tradición minera se remonta a muchos siglos atrás, las antiguas culturas utilizaron los metales básicamente como ornamentos y herramientas utilitarias, supieron trabajar el cobre, la plata, el oro, las piedras semipreciosas, dejándonos como legado obras que son admiradas en todo el mundo.

Hoy en día, la minería es el principal motor de la economía nacional, principalmente porque se ubica en los lugares más apartados del país, generando que la economía de sus alrededores se beneficie con su presencia. Pero, la contribución no es solamente por su operación, sino que la legislación de nuestro país ha contemplado que los gobiernos regionales, las municipalidades provinciales y distritales se vean beneficiadas por la presencia de la minería en sus alrededores.

Todas las empresas mineras que obtienen utilidades durante un año, pagan al estado el impuesto a la renta de este monto recaudado, el 20% se distribuye en los gobiernos regionales y locales y se le denomina canon minero.

El gráfico 2 indica la importancia de este sector en las exportaciones totales del Perú, los datos mostrados corresponden a 1996

Exportaciones en 1996

Sector	Minería	Otros
Porcentaje	45%	55 %

Exportaciones en 1996

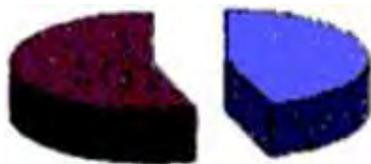


Gráfico 2

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM)

2.2. - DEFINICION DEL SISTEMA: LA EMPRESA

El tema de tesis fue desarrollado en tomo a una empresa minera dedicada a la extracción, procesamiento y comercialización de oro, dicha mina funciona bajo la modalidad de tajo abierto y los resultados obtenidos son perfectamente aplicables a minas que tienen la misma modalidad de operación. En el gráfico 3, mostramos un organigrama de la empresa, seguidamente, explicamos algunos conceptos importantes, usados en el entorno minero y describimos las operaciones principales de interés para el estudio.

ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

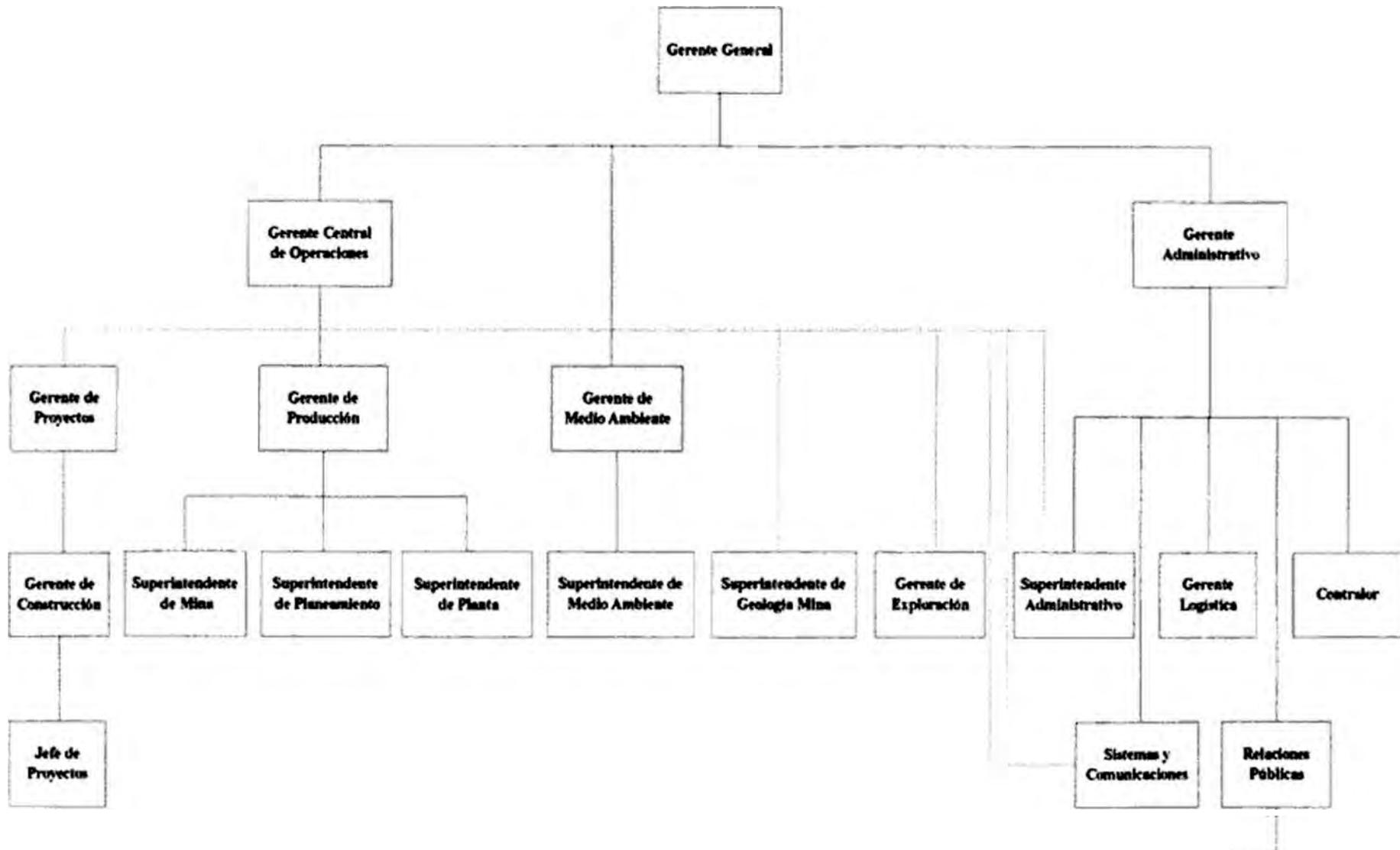


Gráfico 3

Principales Conceptos en el Entorno Minero:

Mina a Tajo Abierto.

Una mina a tajo abierto (open pit mine) es aquella que no tiene socavones (túneles), es decir la extracción del mineral se inicia exactamente sobre la superficie del terreno, esto implica que en forma gradual la mina se ampliará hasta agotar las reservas establecidas de acuerdo al modelo geológico. Al final, toda la superficie que originalmente pudo haber sido un cerro o unas pampas extensas queda con una figura similar al de un inmenso estadio, donde cada uno de los escalones los denotamos como bancos (bench).

Diseño de PIT

Un diseño de PIT es aquel que establece los límites geológicos de una mina, dicho de otro modo, separa el material que será extraído de la superficie del terreno de la que no se extraerá. En el gráfico 4, mostrado abajo se tiene un diseño de PIT, el que a su vez esta subdividido en fases, cada fase también está formada por bancos y los bancos por bloques. La definición de los límites del PIT obedecen a diversos criterios, entre ellos la ley del mineral y la ubicación del cuerpo del mineral en el área bajo estudio: así, si se tuviera una porción de mineral con una ley bastante alta en la parte inferior del PIT ya diseñado, tal vez no sea económicamente interesante extraer dicha porción, ya que implicaría extraer más desmonte (material no útil) antes de poder llegar al lugar donde se encuentra dicha porción de mineral con una ley alta. Los otros criterios podrían ser los geotécnicos, que determinan el ángulo máximo posible que se les puede asignar a las paredes del PIT. Este criterio implica que cuanto más profundo sea el PIT, tendremos un ángulo más suave en las paredes del PIT.

Note que al final de la vida de la mina, el terreno quedara con una figura similar al de un estadio inmenso.

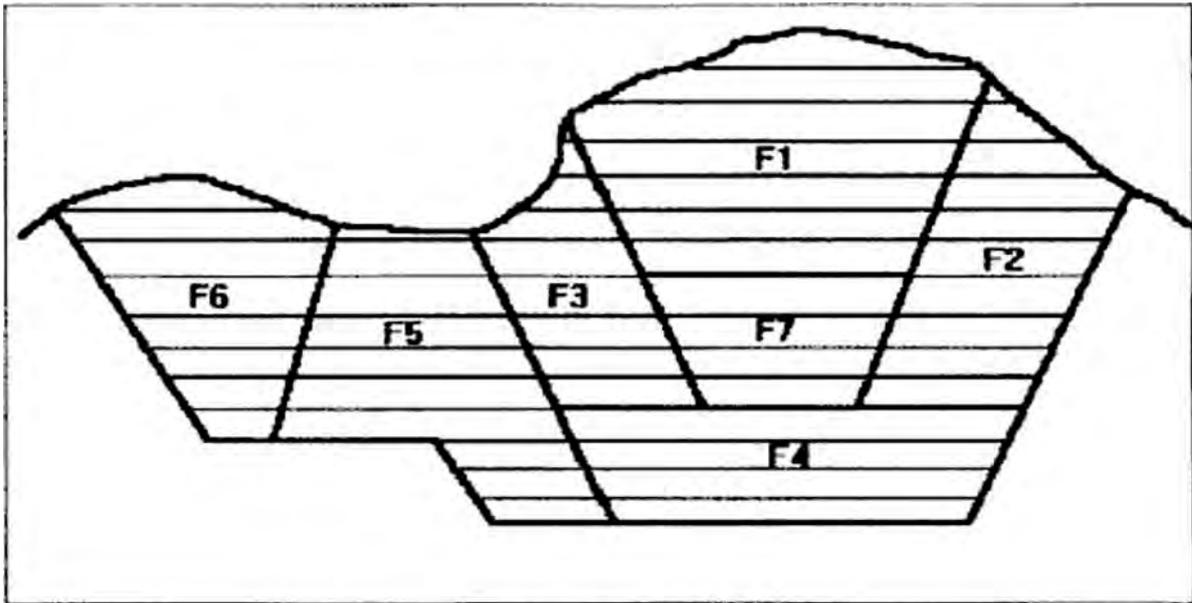


Gráfico 4 - Diseño de Pit

Fases y Bancos.

Las fases son aquellas subdivisiones de un diseño de PIT, las razones para la generación de las fases obedecen a cuestiones económicas, es decir dependiendo de la distribución física del cuerpo del mineral en todo el PIT, puede ser más conveniente extraer primero aquella porción que posea una ley más alta, la creación de las fases obedecerá a tales criterios entre otros, en el gráfico 1 mostrado arriba se puede distinguir unas líneas horizontales, las que reciben la denominación de bancos, cada banco tiene una altura aproximada de 8 metros, pudiendo ser modificado a 12 o 6 metros de altura, dependiendo de criterios asociados a la velocidad de producción;

Principales Procesos en el Sistema

En el gráfico 6, mostrado abajo, se presentan los procesos necesarios para la obtención del oro, algunos de estos son retroalimentados y constantes a través del tiempo. A continuación explicamos los que tienen repercusión directa dentro de los límites del sistema definido.

Exploración.

El proceso se inicia con la exploración de campo, en la que se realizan las tareas de "geología de exploración" y determina las zonas donde posiblemente se encuentra el mineral; a estas zonas las denominan "anomalías". Una vez identificadas las zonas probables de explotación, se realiza la siguiente etapa de exploración más detallada. Con toda esta información se construyen los modelos geo estadísticos de la mina, es decir se definen los bloques (los bancos están formados por bloques) y la conformación de cada uno de estos, de modo que se conoce, estadísticamente, la ubicación del cuerpo mineral y las leyes respectivas en el subsuelo.

Una vez determinada la configuración de materiales en el subsuelo, se determina el modelo de PIT que tendrá la mina, para lo cual se hace uso de diversos criterios, entre ellos el principal es el económico, es decir, dependiendo del precio del mineral, el margen de utilidad deseada y las leyes obtenidas en la mina, un diseño de PIT podría tener diferentes dimensiones y formas.

Una vez que la mina esta modelada, se hacen los planes de producción, dados ciertos requerimientos, dichos planes son de dos tipos, a largo plazo o estratégico y el plan a corto plazo. El plan a largo plazo generalmente cubre un horizonte equivalente a la vida de la mina, las que dependen de las reservas de la misma, este tiempo podría variar de 3 a 15 años, o tal vez más en minas mucho más grandes. Una vez generados los planes a largo plazo se deben generar los planes a corto plazo, esto es establecer los planes anuales, mensuales, semanales y diarios. La siguiente etapa es la de la implementación de los planes, este proceso es denominado "minado", el cual implica diversas labores y gran coordinación logística, es tal vez el trabajo más duro e implica las tareas de perforación, voladura. Carguío y acarreo de todo la materia de la mina hacia sus destinos.

Perforación.

Estas perforaciones son realizadas en las minas para poder colocar los explosivos a una profundidad que podría ser de ocho metros para aquellos bancos que tienen una altura de seis metros, recuerden que cada banco es un nivel que debe salir en forma total o parcial antes que el banco inmediatamente inferior pueda comenzar a ser extraído, esta tarea es realizada con unos equipos denominados "perforado ras", esta tarea es costosa por que los insumos necesarios son desgastados rápidamente.

Voladura.

Una vez finalizada la labor de perforación, la siguiente etapa es la de voladura, para lo cual se usa una mezcla de explosivos cuidadosa y estratégicamente introducidos en cada hoyo perforado, para después, usando una serie de detonadores hacerlos explotar, esta es una labor muy delicada y requiere de mucha coordinación.

Carguío.

Una vez que el terreno ha sido suavizado por las explosiones, comienza la labor de cargar los diferentes materiales a sus respectivos destinos, dependiendo de los diversos minerales y la conformación del subsuelo, estos materiales pueden ser variados (pero las conclusiones son perfectamente adaptables a diversas configuraciones), en el caso de la mina objeto de este estudio se encontraron los siguientes tipos de materiales:

Mineral

Desmante Oxido.

Desmante Argilico.

El mineral es aquel material apto para ser procesado, es decir tiene las cantidades mínimas de componentes como para ser considerado económicamente factible de ser procesado. Este material tiene como destino un lugar denominados Pad, que es una gran extensión de terreno especialmente acondicionada.

El otro conjunto de materiales no aptos para ser procesados es denominado desmante, y existen dos tipos de desmontes, el desmante oxido es aquel que puede ser llevado a los botaderos (lugares acondicionados para poder contener el material sin valor) sin mayores consideraciones. Existe además otra clase de desmante denominado "Argilico", el cual también debe ser enviado a los botaderos, pero, se deben tener algunas consideraciones para proteger el medio ambiente, ya que este material en contacto con el agua genera una serie de ácidos perjudiciales para este. El argílico debe ser encapsulado o cubierto por varias capas de óxido para evitar la generación de tales ácidos.

Acarreo.

Una vez cargados los diversos materiales (mineral o desmonte) en los camiones (proceso denominado carguío), este tiene que ser transportado a sus respectivos destinos. Así el mineral es enviado a los pads y el desmonte a los botaderos, los camiones usados para realizar estos trabajos generalmente poseen entre 100 y 300 TMS (toneladas métricas secas) de capacidad, dependiendo del tamaño de la mina. En la mina usada como objeto de estudio, las capacidades de los camiones son de 100 TMS y 150 TMS.

Lixiviación.

Una vez transportado el mineral a sus respectivos destinos, comienza el proceso de lixiviación, por medio del cual se extrae el oro del mineral depositado en los pads, donde para el caso de la mina analizada se usa una mezcla de diversos químicos conteniendo cianuro, el cual al precipitarse captura las partículas de oro y las arrastra al fondo del pad. En este contexto, un pad es un lugar cuidadosamente preparado, el que está cubierto por una membrana plástica y en la parte inferior tiene unas tuberías para bombear el líquido que filtra desde la superficie hasta la membrana impermeable, esta mezcla es bombeada hacia unas piscinas esperando ser refinadas posteriormente.

Refinación

Luego del proceso de lixiviación, los fluidos acumulados en las piscinas deben ser sometidas a un proceso de refinación, en unos hornos especialmente diseñados para, en el caso de la obtención del oro, obtener los lingotes denominados “barras de oro dore”, denominadas así debido a que los lingotes no están conformados no solamente por oro, sino también por plata en un porcentaje pequeño (casi un 30%), en esta etapa el producto final está listo para ser comercializado. A continuación mostramos en el gráfico 5, algunas ubicaciones físicas de la mina y un diagrama de los procesos, en el gráfico 6, que se realizan para la obtención de los lingotes de oro.



Gráfico 5- Algunas ubicaciones de la mina, donde apreciamos un pad y las piscinas de lixiviación

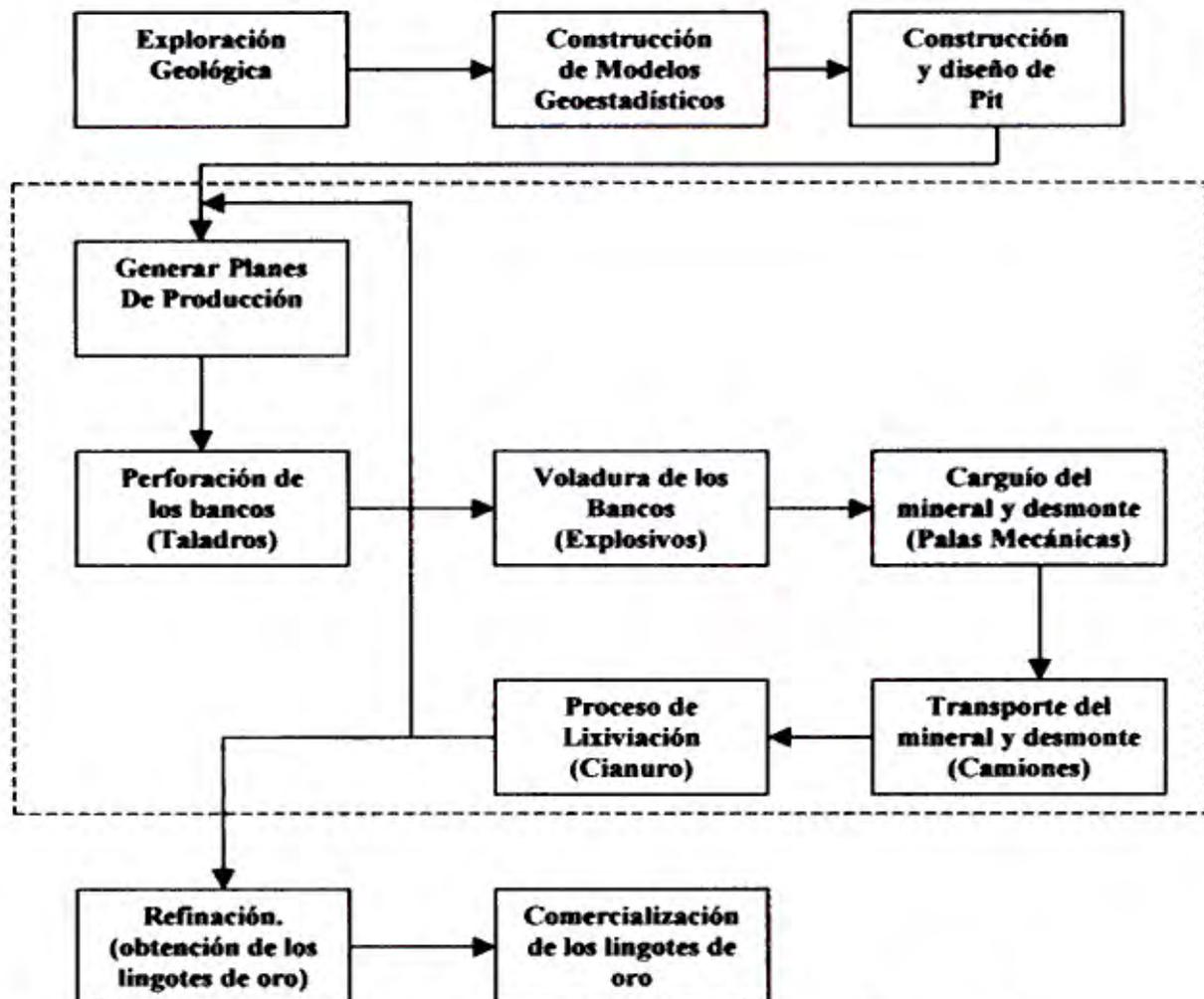


Gráfico 6 - Diagrama del proceso de obtención de los lingotes de oro
El cuadro punteado establece el límite de interés del sistema en estudio

23.- FORMULACION DEL PROBLEMA

El Gerente General y el staff inmediatamente inferior de la empresa minera (contador general. Gerente de Operaciones. Gerente de Producción. Superintendente de Planta. Planeamiento, y Mina), notaron que los costos de producción de las barras doré (aleación de oro y plata en menor porcentaje), estaban conformadas principalmente por el proceso comprendido desde la etapa de perforación hasta el de acarreo o transporte (casi el 70 % de los costos), siendo además, el costo de acarreo, el que tenía el porcentaje de participación más alto en su estructura de costos Cabe destacar que el costo de acarreo resulta de calcular un costo total asignado a cada tonelada de material transportado desde un cierto origen hasta un destino. Siendo los planes de producción a largo plazo los que definen las distancias a recorrer y el instante de tiempo en que deben recorrerse.

Las conversaciones sostenidas con el Gerente General y el Staff de contabilidad y superintendentes dieron por resultado:

- El entendimiento de que, aunque los costos de producción de la mina eran uno de los más bajos a escala mundial, estos, podían seguir bajando y aumentar los rangos de utilidad
- Acordaron que, la forma en que se generaban los planes de producción a largo plazo, usando una hoja de cálculo no era lo suficientemente exhaustiva para analizar todas las consideraciones en una operación de esta naturaleza.
- La necesidad de una herramienta que permita generar los planes de producción a largo plazo, buscando reducir el valor actual neto en función de los costos de operación e inversión.

En resumen se estableció que:

- La dirección de la empresa reconoció que el problema era importante, en el ámbito estratégico y táctico.
- La prioridad asignada al estudio era bastante alta.
- La opinión subjetiva era que se iban a obtener buenos resultados, pero, no se podían definir en forma cuantitativa aún.

2.4. - LOS OBJETIVOS DEL SISTEMA

El área de interés en todo el proceso minero (para el problema planteado al inicio), comienza con la generación de los planes de producción y los procesos siguientes hasta la lixiviación (ver gráfico 4 en la página anterior). Los objetivos del sistema se resumen del siguiente modo:

- Producir la cantidad de onzas de oro requeridas en cada periodo. Este requerimiento esta expresado en millones de onzas de oro y están dados por los accionistas.
- Producir las onzas de oro especificadas por los accionistas a un costo mínimo para el horizonte de vida de la mina, pero además estos costos deben ser expresados en función a) Valor Actual Neto, necesario para los cálculos del área de finanzas e inversiones.
- Mantener uniformes los crecimientos de toneladas de material y también las toneladas - kilómetro generado en cada año de producción para mantener al mínimo la cantidad de equipos para el carguío y acarreo del mineral y desmonte y no quedar con una cantidad grande de equipos en propiedad de la mina al finalizar sus reservas.

2.5. - RECOPIACION DE INFORMACION

Los procesos mencionados anteriormente deben ser entendidos y representados en el computador, con todas sus complejidades, con el fin de generar una solución que satisfaga nuestros requerimientos al costo mínimo.

La información que influye en las decisiones que se toman en la mina es clasificada como exógena y endógena.

Variables Exógenas del Sistema

El precio del oro en el mercado internacional es un factor primordial para establecer los planes de producción, así como en la generación de los modelos de PIT, los que también influyen en las reservas de la mina.

Los requerimientos de producción de oro (en onzas) son especificados por los inversionistas, los que basados en los análisis financieros, proyecciones y demás criterios deciden la cantidad de oro a requerir en cada año.

Variables Endógenas del Sistema

El proceso de construcción de los planes de producción requiere la utilización de gran cantidad de parámetros, entre los que mencionamos la información proveniente de los modelos geológicos (diseño de PIT), los que son manejados al nivel de bancos.

Esto implica que se tiene la información de cantidad de mineral, desmonte oxidado, desmonte argílico, ley y porcentaje de recuperación de cada uno de los bancos, así como las distancias desde los bancos hacia los diversos destinos denominados pads para el caso del mineral y botaderos para el caso del desmonte.

Se incluyen también los costos de perforación, voladura, carguío y acarreo como costos de minado.

Los costos de inversión en infraestructura, tales como construcción de pads y botaderos también son incluidos.

Los costos de inversión en equipos tales como camiones, palas y perforadoras son incluidos.

Los costos de procesamiento del mineral son también incluidos, esto implica el procesamiento.

CAPITULO III

EL SISTEMA PARA EL SOPORTE DE DECISIONES (SSD)

3.1. - EL SSP Y SUS CARACTERISTICAS

Hoy en día no podemos hablar de sistemas de información de la empresa y modelos para la toma de decisiones en forma aislada, sino que, nos referimos a estas como subsistema de información de la empresa, subsistema de modelos para la toma de decisiones y de una interface que haga posible el establecer un vínculo entre estas, la que da lugar a la generación de los SSD, cuyos componentes fueron detallados en el capítulo anterior (Ver gráfico I, página 19)

En la práctica, la utilización de los modelos matemáticos para la toma de decisiones no tienen mucha acogida por parte de los tomadores de decisiones y la situación es aún más crítica en países en vías de desarrollo, lo cual es particularmente cierto en el Perú.

Es un objetivo del presente trabajo, dar a conocer y demostrar que la utilización de métodos y modelos cuantitativos como apoyo para la toma de decisiones es una alternativa real.

Esta alternativa, además debe ser implementada de tal modo que el usuario final pueda introducir parámetros, acceder a repositorios de datos transaccionales de la empresa y obtener informes en los niveles gerenciales, tácticos y operativos, según sean las necesidades de la empresa usando siempre un entorno computacional amigable y gráfico.

Los componentes del SSD desarrollado para el caso de la mina son listados abajo,

- Interface del SSD
- Subsistema de datos
- Subsistema de los modelos

Revisaremos ahora las características de cada uno de estos componentes y las interrelaciones existentes bajo el entorno de la empresa minera Recordemos, del capítulo I, que la Interfa.se del SSD establece el enlace entre el subsistema de datos (formado por los sistemas transaccionales de la empresa) y el subsistema de modelos (formado por los modelos para la toma de decisiones).

3.2. - INTERFACE DEL SSP

La interface del SSD, coordina las labores de ingreso (realizado por los usuarios) y lectura de datos (desde el subsistema de datos de la empresa) necesarios para ejecutar los modelos y también interpreta los resultados generados por el subsistema de modelos, presentándolos en un formato amigable.

Dicha interface, permite al usuario mantener una interacción con los modelos matemáticos de optimización de una manera simple y transparente.

El diagrama HIPO (por sus siglas en inglés), de jerarquía de Ingreso, Proceso y Salida de datos mostrado en el gráfico 7, describe como se realiza el flujo de información, los procesos que necesitan dicha información y los resultados obtenidos por los procesos internos, que a su vez puede generar un flujo de información necesario para ejecutar otros procesos.

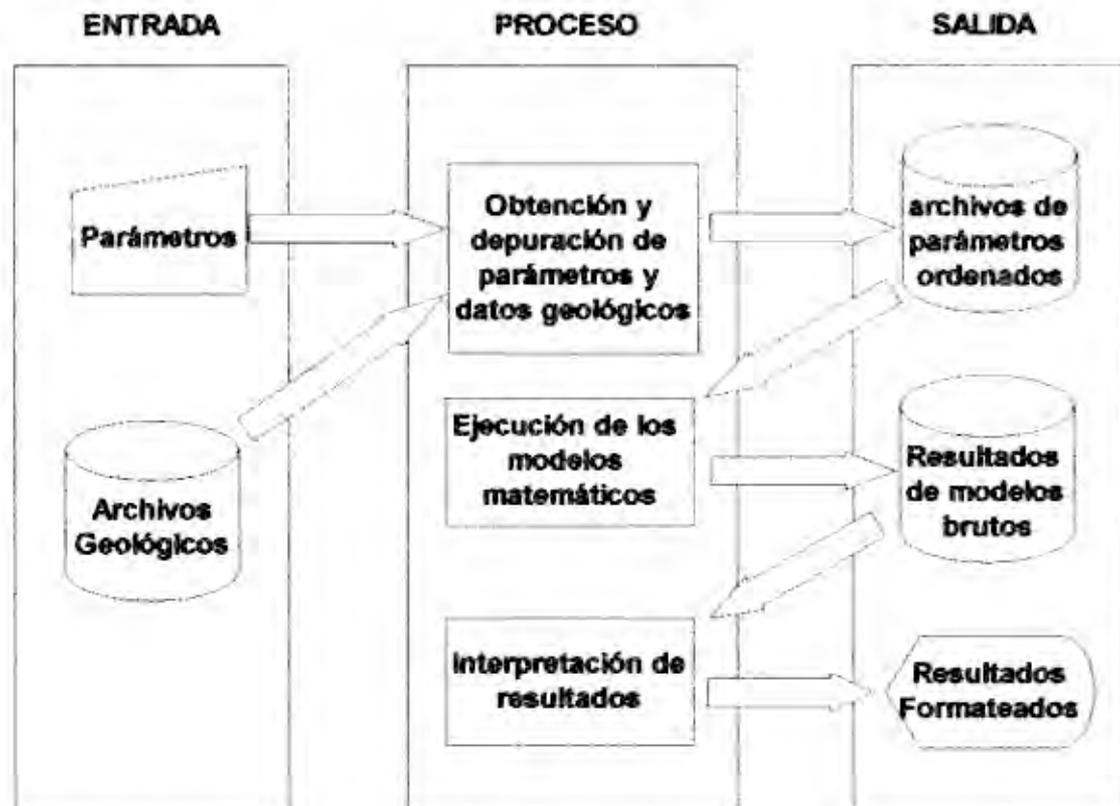


Gráfico 6 – Diagrama HIPO, Relaciones entre la entrada, proceso y salida de la interfase

De acuerdo al gráfico superior, la interfase permite obtener información de la base de datos de geología para cada uno de los bancos, así tenemos la siguiente lista:

- Código del banco
- Total de toneladas
- Toneladas de mineral
- Toneladas de oxido
- Toneladas de argilico
- Toneladas de desmonte y
- Onzas de oro

Además de los parámetros complementarios ingresados por los usuarios como por ejemplo:

- Horizonte de producción
- Producción requerida por año
- Año de inicio de explotación de cada mina
- Tasa de descuento del VAN
- Costos de producción
- Distancias
- Densidad de la mina
- Tipo de equipos a adquirir
- Costo de los equipos a adquirir
- Ratios de inversión en pads y botaderos por cada tonelada de mineral y desmonte extraídos, entre otros.

Esta interface, permite el ingreso de todos estos parámetros, accedendo la base de datos transaccional (del subsistema de información), para obtener información geológica en forma transparente para el usuario y, a través, de un periférico como el teclado, para que el usuario pueda interactuar con el SSD.

Una vez ingresados todos los parámetros, éstos serán usados por el subsistema de modelos (modelos matemáticos), el que determinará la mejor alternativa, generando un reporte de la solución. Dicho reporte, lista un conjunto de variables, índices y valores que representan el planeamiento a largo plazo (en primera instancia solo entendió les por los analistas responsables del diseño y construcción del subsistema de modelos). Este reporte no es fácil de descifrar por lo que es necesario el uso de un módulo de interpretación de resultados que permita hacer una traducción de las variables, índices y sus valores, esta labor también es realizada por la interface, esto permitirá a los usuarios obtener resultados de fácil entendimiento y hasta en formato gráfico.

3.3. - EL SUBSISTEMA DE DATOS PE LA EMPRESA

Como mencionamos al inicio del capítulo, el subsistema de datos de la empresa es uno de los componentes del SSD (Ver gráfico 1, página 19)

El subsistema de datos de la empresa, apoya en las operaciones de la mina permitiendo a los geólogos almacenar información referente al análisis de sub suelo y construcción de modelos estadísticos de la composición del mismo, así como, actualización de las reservas de mineral a medida que la explotación del mineral avanza. Este subsistema tiene diversos módulos de captura, almacenamiento y procesamiento de información, entre estas tenemos:

- Módulo de captura de información y almacenamiento de muestras geológicas.
- Módulo de construcción de modelos geológicos (Miner)
- Módulo de control de minado (Ore control)

El módulo de captura y almacenamiento de muestras geológicas, es usado por las diversas áreas de geología y registra la información de campo de los geólogos exploradores, los que, valiéndose de muestras, algunas de ellas obtenidas mediante perforaciones, analizan las diversas áreas para determinar los lugares donde existe el mineral con oro.

El módulo de construcción de modelos geológicos (Miner), usa la información proporcionada por las muestras geológicas, para crear los modelos geológicos, esto es, crear modelos que describen la conformación del subsuelo (usando técnicas estadísticas) y permiten identificar el lugar en que se encuentra el mineral. Estos modelos, permiten crear los diseños de pits (conformados por bancos).

El módulo de control de minado (Ore control), es usado para actualizar y comparar la información de las áreas minadas (cuando se extrae el mineral). Esto es realizado en forma constante a medida que se avanza en la explotación.

Todos estos módulos generan la información geológica necesaria para las labores de la mina, almacenándolas en bases de datos centralizadas, las mismas que pueden ser accesadas desde estaciones de trabajo locales o remotas. El gráfico 8, muestra el modo como se enlazan estos módulos. Dicha información es también usada por los modelos matemáticos.

Relaciones entre los módulos del snb sistema de información de la empresa y la base de datos centralizada

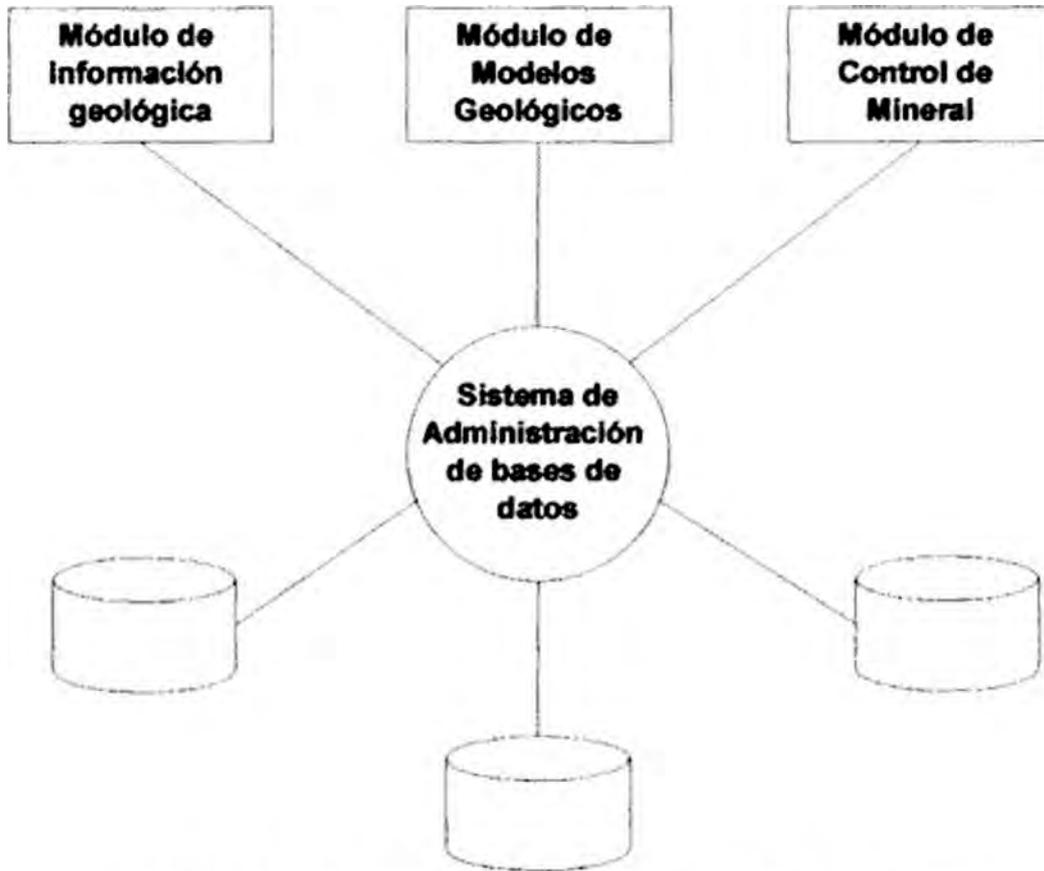


Gráfico 8 – Elementos del sub sistema de datos de la empresa

3.4. - EL SUBSISTEMA DE IX)S MODELOS

Como mencionamos en el capítulo I, el SSD tiene un componente denominado subsistema de modelos, el cual está formado por aquellos modelos que apoyaran a los usuarios en la toma de decisiones y serán utilizados en forma transparente para el usuario a través de la interface del SSD. El subsistema de modelos, usará

información del subsistema de datos de la empresa y también aquella ingresada como parámetros.

El subsistema de modelos está formado por un conjunto de cuatro modelos, de los cuales, dos han sido implementados totalmente y los otros restantes han quedado pendientes de desarrollar, pero, cuyo prototipo ya ha sido desarrollado, en forma separada del SSD, pero contemplándose la posibilidad de reunir todo bajo una misma interface.

Los cuatro modelos mencionados son los siguientes, de los cuales los dos primeros ya han sido implementados:

- Modelo de selección de destinos (pads y botaderos)
- Modelo de Planeamiento a Largo Plazo
- Modelo de simulación para la evaluación de equipos y tecnología a adquirir
- Modelo de simulación financiera para medir el riesgo de las decisiones

El modelo de selección de destinos, tiene por objeto, apoyar en la selección de los lugares donde se depositará el mineral y desmonte a desplazar. El resultado generado por este modelo, es además un input para el modelo de planeamiento a largo plazo, puesto que define las distancias que existirán desde la mina al lugar donde se inicia el proceso de lixiviación y donde se depositará el desmonte Lo cual no implica que su utilización sea imprescindible.

El modelo de planeamiento a largo plazo, tiene por objeto, la generación de los planes de producción e inversión a largo plazo y la determinación, basándose en los resultados obtenidos, del plan estratégico de producción e inversión en equipos e infraestructura necesaria. Este es el modelo más complejo y de mayor tamaño, por la cantidad de variables y restricciones definidas en el mismo y el que se explicara en detalle en el siguiente capítulo.

Modelo de simulación para la evaluación de equipos y tecnología a adquirir, que emplea los resultados arrojados por el modelo de planeamiento a largo plazo y

permite verificar si el proceso de extracción de mineral será ejecutado de acuerdo al plan establecido con los equipos existentes y por adquirir.

Modelo de simulación financiera, para la medición del riesgo en el plan de inversiones en el entorno de incertidumbre que rodea a las operaciones de comercialización de los minerales.

El gráfico 9, muestra un esquema del subsistema de modelos, donde apreciamos la precedencia de los modelos.

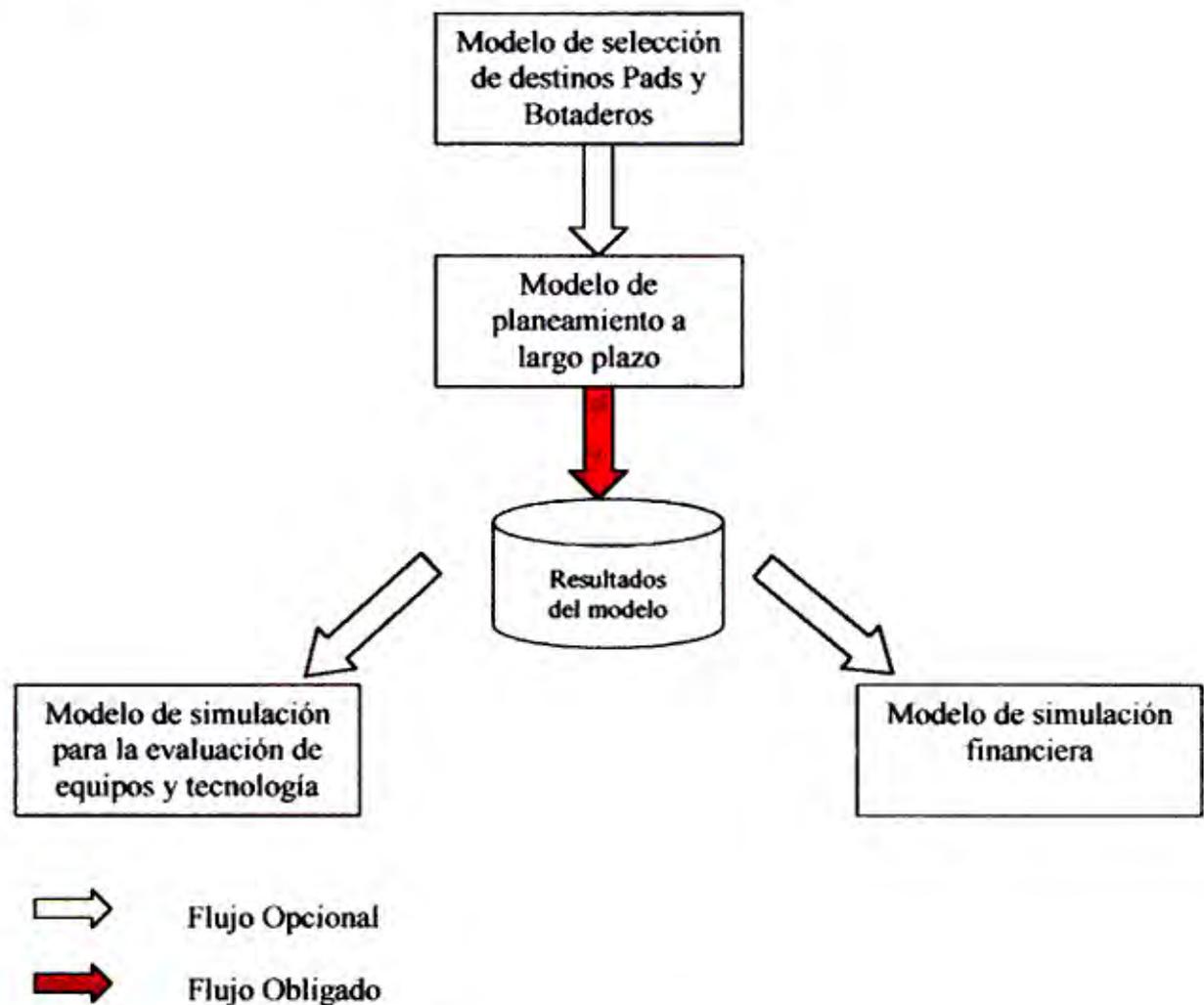


Gráfico 9 - Esquema del subsistema de modelos

CAPITULO IV

EL MODELO DE PLANEAMIENTO

A LARGO PLAZO

4.1. - ANTECEDENTES

Como mencionamos en el capítulo anterior el subsistema de modelos está formado por 4 modelos, el modelo que desarrollaremos en este capítulo es el de planeamiento a largo plazo.

En el proceso de producción de la mina, nos interesa determinar los bancos, minas y fases de las cuales se extraerá el mineral en cada año del horizonte de vida de la mina, con el objeto de lograr las metas de producción.

No se consideran fracciones de bancos, es decir, el plan asigna bancos completos a un año cualquiera para ser minado

El enfoque adoptado para el desarrollo del modelo de planeamiento a largo plazo no ha sido encontrado en las publicaciones especializadas y bibliografía revisada. Hay trabajos hechos que consideran la maximización de las utilidades y hasta hay herramientas comerciales disponibles en el mercado para la generación de los planes de producción a largo plazo, pero, la existencia de relaciones entre sus fases definidas en las minas y otras particularidades, hacen que dichas aplicaciones sean no aplicables a realidades específicas y los costos de adquisición y costo de propiedad de tales productos comerciales son altos (por ejemplo MedModel).

El desarrollo de SSD con todos sus componentes, contando además con la colaboración de la gerencia de la empresa minera para llevar a cabo todas las etapas de análisis, desarrollo e implementación de los resultados obtenidos nos permitió crear un producto (el SSD), que permite una fácil integración a los diversos sistemas de las empresas mineras y una rápida adaptación a las realidades específicas de cada mina y sus operaciones a un costo muy inferior de los productos comerciales ya existentes que además no son muy flexibles para las diversas realidades.

4.2. - CARACTERISTICAS GENERALES

Existen algunas definiciones necesarias para el desarrollo del modelo, las cuales son detalladas a continuación:

- **La Función Objetivo:**

La función objetivo planteada es el Valor Actual Neto de los costos de producción e inversión en equipos e infraestructura, el cual debe ser minimizado. Esta elección está basada en el hecho de que los precios internacionales del oro son muy variables y es más seguro proyectarlos considerando solo los costos de producción e inversión en equipos e infraestructura.

- **Tipos de Minas:**

La formulación matemática del modelo de Planeamiento a Largo Plazo considera dos tipos de mina; las *Minas Modelada*, aquellas que poseen un modelo geológico con información detallada de sus bancos, leyes, tonelajes, tipo de material, densidad, altura de los bancos y otros parámetros. Y las *Minas No Modeladas* que son minas que no poseen un modelo geológico al detalle por bancos, solo se tiene un estimado de sus reservas y que son llamadas anomalías.

Ambos tipos de mina son consideradas para el Planeamiento a Largo Plazo.

- **Tasa de producción**

La tasa de producción está dada por la capacidad y cantidad de los equipos a utilizar en cada banco, donde se considerará el equipo de mayor capacidad disponible o por disponer; a su vez, la cantidad de equipos (palas y camiones) desplegados en cada banco resulta de dividir la mitad del área correspondiente a cada uno de los bancos

entre el espacio requerido para el equipo correspondiente, de acuerdo a sus dimensiones y capacidad.

- **Bancos Predecesores:**

Para cada uno de los bancos, no se puede extraer un banco inferior si los bancos superiores no han sido extraídos.

- **Fases Predecesoras:**

Para aquellos diseños de PIT, donde se considera la existencia de fases, si existe una fase F1 que está sobre otra fase F2, entonces no se podrán extraer bancos de la fase F2 hasta que todos los bancos de la fase F1 hayan sido extraídos.

- **Fases Adyacentes:**

Para aquellos diseños de PIT, donde se considera la existencia de fases, si existe una fase F1 que es adyacente a otra fase F2, además si F1 es la fase que se apoya sobre la fase F2, entonces para que se pueda extraer un banco de la fase F2, el banco del mismo nivel en la fase F1 ha tenido que ser previamente extraído, o que toda la fase F1 haya sido extraída.

En el gráfico 9, mostrado abajo puede apreciarse que existe cierta porción de la fase 1 adyacente a la fase 2, lo cual implica que:

- Si se extrae un banco de la fase 1, el cual se encuentra en la zona de adyacencia, entonces se podrá extraer el banco de la fase 2 que se encuentra al mismo nivel del extraído en la fase 1.
- Si se extraen todos los bancos de la zona de adyacencia en la fase I, entonces se podrá extraer cualquier banco de la fase 2.

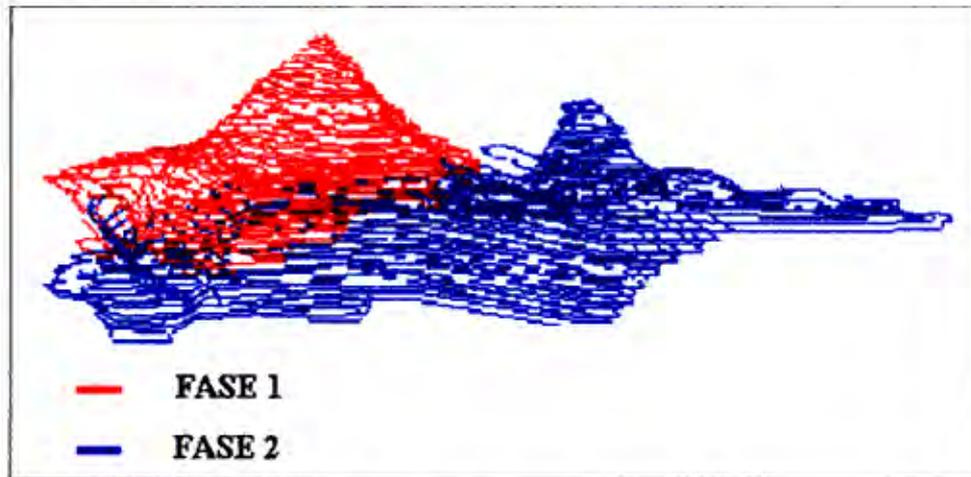


Gráfico 9 - Un diseño de pit con dos fases

- **Estados de las Fases:**

Para una fase cualquiera, esta puede tener los siguientes estados: independiente (no estar sujeta a la extracción de bancos de otras fases), predecesora o adyacente.

- **Manejo de índice (Fases)**

El modelo matemático de planeamiento considera como índice de manejo **la fase**. El ingreso de parámetros de minas y fases al sistema de interfase guarda un orden en la posición. El modelo reconoce como uno de sus índices la posición de las fases.

- **Selección de Bancos Enteros**

El modelo solo selecciona bancos enteros por año y fase. Es decir no selecciona porciones de bancos.

- **Número de Camiones**

La cantidad de camiones considerados para cada año no es un número entero, sino continuo, esta consideración nos permite ganar velocidad en el tiempo de ejecución y no se genera mucha distorsión entre la realidad y el modelo representativo de ésta.

• **Costos:**

Los costos considerados son:

- Perforación
- Voladura.
- Carguío.
- Acarreo.
- Procesamiento.
- Construcción de pads.
- Construcción de botaderos
- Inversión en camiones.

Se tienen algunas consideraciones para los costos mencionado arriba, los que son descritos a continuación:

1. Los costos mencionados anteriormente son ingresados usando la interface del SSD. Para las minas que están en producción, se tienen costos más precisos, los costos se deberán ingresar por mina (los costos no son iguales para todas las minas, sobre todo en el de perforación, voladura, y carguío). Para las minas que no están en producción se ingresa un costo promedio para cada ítem de costo considerado
2. La interface del SSD, prepara los parámetros de costos, en el formato que el modelo los necesita. Para las minas modeladas (poseen modelo geológico) o que están en producción, el programa de interface realiza un análisis de costos para cada uno de los bancos, asignando un único valor económico a cada banco (costo de banco).
3. Los costos de perforación (\$/Ton), voladura (\$/Ton) y carguío (\$/Ton) están en función a toneladas en general, la que es conocida para cada banco y por lo tanto es posible predefinir dichos costos para cada uno de los bancos.

4. El costo de procesamiento (S/Tonelada-Mineral) y el costo de construcción de pad (\$/Tonelada-Mineral) está en función a las toneladas de mineral, la que es conocida para cada banco, por lo tanto también puede predefinirse.
5. El costo de construcción de botadero (S/tonelada-Desmorte) está en función al tonelaje de oxido y argílico (desmorte), la que también es conocida para cada banco, por lo tanto también puede predefinirse.
6. El costo de acarreo (S/Ton - Km) de cada banco depende de las toneladas de mineral, desmorte y los kilómetros a recorrer. Dichos parámetros son conocidos, menos los kilómetros recorridos, estos serán hallados usando el modelo de localización (segundo módulo) para cada uno de los bancos
7. Para las minas que no tienen un modelo geológico, no poseen bancos (minas no modeladas), el programa de interface halla un costo por onza para cada mina. Este costo depende de los parámetros de las reservas de onzas, total de toneladas de mineral, desmorte y los costos promedios inicialmente considerados para las minas no modeladas, también incluye los costos de acarreo considerando las distancias a los pads y botaderos desde el centro de la mina.
8. En conclusión el modelo maneja los parámetros de costo por banco en las minas modeladas y costo por onza en las minas no modeladas.
9. La interface del SSD, transmite estos parámetros al modelo de planeamiento (modelo matemático). Una vez que cada uno de los bancos (de las minas modeladas) ya tiene asignado un valor económico (costo de banco), y un costo por onza para las minas no modeladas, el modelo matemático de planeamiento hallará la secuencia óptima de extracción de bancos en función a sus costos y a la contribución de sus onzas, y seleccionara en las minas no modeladas las onzas necesarias de acuerdo a su costo, buscando siempre obtener el costo más bajo.

10. Para la inversión en camiones, el modelo matemático tiene en consideración una suavización en los picos de Tonelaje-Kilómetro.

- **Suavización de las Toneladas - Kilómetro**

El modelo de Planeamiento considera una suavización de los Toneladas - Kilómetro, a través de la inversión en camiones. La formulación del modelo contempla invertir en camiones si las Toneladas - Kilómetros en el año “ t ” son inferiores al Tonelaje - Kilómetro del año t . Por lo tanto si la tendencia del modelo es minimizar los costos a través del VAN, entonces buscara un plan de inversión en camiones optimo, considerando controlar un despunte en los Tonelajes - Kilómetros en el horizonte de planeamiento hasta donde sea posible.

El modelo trata de disminuir la inversión en camiones, tratando de suavizar las diferencias de los Tonelajes - Kilómetros de un año con respecto a otro, a través del horizonte de planeamiento.

- **Requerimiento de Producción:**

La cantidad de onzas de oro a producir por año debe ser igual o lo más cerca posible por exceso al requerimiento anual.

Observación del Requerimiento de Producción:

Se debe considerar que los valores de las onzas y tonelajes obtenidos por año en el planeamiento optimizado difieren mínimamente del requerimiento original (en el caso de las onzas) debido a la escala y al factor de redondeo. Estas pequeñas desviaciones por defecto o exceso no alteran los resultados, son despreciables para fines de obtener un planeamiento a largo plazo. Esta medida trae como consecuencia bajar el tiempo de procesamiento de CPU.

Máximo Total de Toneladas

Se tiene en consideración una restricción particular de tonelaje, debido al congestionamiento (pues se necesitan camiones) que causaría tonelajes mayores a los máximos permitidos en los destinos.

• Cantidad de Camiones a Adquirir Como Variable Real

La cantidad de camiones a determinar para cada año no es una variable entera, sino continua, arrastrando un pequeño error, esto es por ganar velocidad en el tiempo de ejecución.

Cuando la variable de cantidad de camiones necesarios para cada año es considerado como una variable entera, el tiempo de ejecución se amplía en forma drástica, de hecho, no se ha podido llegar a una solución óptima para un horizonte de planeamiento amplio, debido a que el modelo no llega ni siquiera a un estado factible.

El valor entero tomado después de ejecutado el modelo es el mayor número entero menor que el resultado obtenido por la variable real que indica la cantidad de camiones a adquirir. En el caso en el cual se tenga como resultado adquirir 19.5 camiones en un año específico, podemos optar por adquirir 19 ó 20 camiones. Entonces, la cuestión es comprar un camión adicional o no comprarlo, pero, el costo total del camión es un porcentaje muy pequeño frente al costo total de operación, por lo que el efecto de considerarlo como una variable real no afecta de manera significativa los resultados.

4.3.- CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS GENERALES

- El Valor Actual Neto, considera la inversión en equipos e infraestructura al inicio de cada año (no a lo largo del año) y con un año de anticipación para el caso de inversión en equipos e infraestructura
- Solo se extraen bancos enteros para cada año, es decir no se tiene algún caso donde se especifique que la mitad de un banco será minado en diciembre del año “i”, y que la otra mitad será minada en el año “i+1”.

- Deben indicarse las relaciones existentes entre las fases de un mismo PIT si es que existieran, además el número del banco donde inicia y termina dicha relación.
- Si para un diseño de PIT donde no existen fases, se desea extraer mineral de alguna zona distinta a la secuencia lógica de extracción de las fases, dicha zona deberá ser definida como una fase, para que el modelo lo considere dentro de sus opciones. Es decir, el modelo es flexible a los cambios en los modelos geológicos planteados por los ingenieros de planeamiento.
- Todas las minas y sus fases son tratadas solamente como fases, por ejemplo una mina que no tiene fases, es tratada como una fase, en total, el modelo maneja hasta 16 fases para el ejemplo mostrado.
- Se tiene en consideración una restricción particular de tonelaje para algunas minas (las que se desee), debido al congestionamiento que causaría tonelajes mayores a los subjetivamente posibles en los destinos correspondientes
- En el resultado del modelo es posible hallar ligeras diferencias en costos totales, toneladas-kilómetros y onzas producidas debido al redondeo usado, pero, no son muy significantes.

4.4.- FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El modelo a plantear es un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM), pues utiliza variables binarias, enteras y continuas; La intención de esta sección es explicar en forma detallada la manera en que se modela el problema de planeamiento a largo plazo para la toma de decisiones en una mina a tajo abierto Se analiza la finalidad de cada una de las ecuaciones usadas además de la notación, la función objetivo y el conjunto de restricciones.

4.4.1. - Notación Usada:

Para escribir cada variable, parámetro y coeficiente, se usa un conjunto de caracteres únicos que la identifica y al final se coloca un conjunto de caracteres precedidos del carácter under line “_” , el cual nos indica a que conjunto corresponde la variable, y el índice de dicha variable, así, tenemos:

A año
F Fase modelada
B Banco
Fnm Fase no modelada

Hacemos una clasificación de las variables usadas en el modelo de acuerdo a la función que esta cumple en el modelo, estas son:

- Variables de decisión.
- Variables intermedias y
- Datos.

Para la definición de la estructura de variables usadas en el modelo usamos los conceptos de conjuntos y atributos:

Conjuntos y atributos:

Un conjunto está conformado por atributos, por ejemplo podemos tener el conjunto camión y sus atributos serán: capacidad de carga del camión, antigüedad del camión, rendimiento del camión, etc.

Además podemos tener otros conjuntos formados por la unión de dos o más conjuntos, que en la práctica es el producto cartesiano de los conjuntos.

En los cuadros inferiores se muestran los conjuntos, atributos, variables y parámetros definidos en el desarrollo del modelo.

Definición de conjuntos y sus atributos

Conjunto	Atributo
Año	Prod Requerida Á Tot Costo A Producción Fallante AnuaJ A TotaJ_Ton Km_A Cap Total Equipo CamionesA Ton Km Exeso Camiones A Ton Km Defecto Camiones A Inversión Camiones A
Parámetros	Cap Inicial Camiones CapIndividualCamiones CostoCamiones Ton Max Permitido
Tasa	Tasa Descuento AnuaJ
Fase	Banco_inicio_F BancoFinalF Año Inicio F
Año Fase	Bancos Selec AF Oz Producidas AF Costo Mina AF Ton Produadas AF Ton_Km_Producidas_AF Toneladas AF
Fase Banco	Onzas FB CostMinaFB Ton_Tasa_FB Ton Km FB Toneladas FB
Año Fase Banco	BinAFB
Fase Fase	Recae En
Se define Fase Fase para establecer las relaciones entre cada una de las fases, un producto cartesiano	Banco Inicio Recae En Banco Final Recae En Encima De
Fase NM	Oz Existentes Fnm CostoOzFnm Afto Inicio Fnm Strip Fnm Recuperación Fnm Ley Fnm Distancia Pad_Fnm Distancia Botadero Fnm
Año FaseNM	Oz Extraídas AFnm Mineral AFnm Desmora e_A fnm Ton Km AFnm

¹ Variable	Descripción
Tot_Costo_A	Total de costo por arto, comprende los costos de producción e inversión en equipos e infraestructura
Tot_Oz_Oro_Producido_A	Total de onzas de oro a producir por año, estas son las onzas recuperadas
Producción_Faltante_Anual_A	Producción de onzas de oro faltante por año. esta es una variable de holgura
Total_Ton_Kra_A	Total de toneladas-kilómetro por año Las toneladas kilómetro resultan del total de toneladas llevadas por los camiones a sus destinos multiplicado por la distancia respectiva
Cap_Total_Equipo_Camiones_A	Capacidad total de camiones por arto, las que son determinadas por la cantidad de toneladas kilómetro anuales requeridas para cumplir con los planes de producción y las capacidades de los camiones
Ton_Km_Exceso_Camiones_A	Toneladas-kilómetro en exceso para camiones por año
Ton_Km_Defecto_Camiones_A	Toneladas-kilómetro por defecto para camiones por año
Inversion_Camiones_A	Inversión en camiones por año. d que resulta de la cantidad de camiones a adquirir para un año específico multiplicado por el precio de los camiones
Bancos_Selec_A F	Bancos seleccionados para ser minados por año y fase.
Oz_Producidas_AF	Onzas producidas por año y fase, la que deberá ser mayor o igual al requerimiento planteado
Costo_MinaAF	Costo de mina por año y fase, la que incluye los costos de cada una de las fases
Ton_Producidas_AF	Toneladas producidas por año y Fase
Ton_Km_Producidas_AF	Toneladas-kilómetro producidas por año y fase
Bin_AFB Esta es la única familia de variables binarias	Variable binaria (0-1) que selecciona el banco acumulado por año, fase y banco, el concepto de bancos acumulados será explicado después con más detalle
Oz_Extraidas_Afnm	Onzas extraídas por año y fase no modelada, estas son onzas recuperadas
MineralAfnm	Toneladas de mineral por año y fase no modelada
DesmonteAfnm	Toneladas de desmonte por año y fase no modelada
TonKmAfnm	Toneladas-kilómetro por año y fase no modelada
VAN	Valor Actual Neto en función a costos

Parámetro	Descripción
Prod_Req uerida_ A	Vector de producción requerida por año, este parámetro contiene los requerimientos anuales deseados por los directivos
Cap_Inicial_Camiones	Capacidad global de la Bota de camiones al inicio del 1er año de producción (toncladas-kilometro/año)
Cap_Individ ual_Camiones	Capacidad individual de un tipo de camión que puede ser comprado, aun no pertenece a la flota (toneladas-kilomctro/año)
Costo_Camiones	Costo de un camión (millones de USS)
TasaDescuento_ Anua l	Tasa de descuento anual aplicada al VAN (valor decimal menor que 1)
Banco_Inicio_F	Vector de número de banco de inicio de las fases modeladas
Banco_Final_F	Vector de número de banco final de las fases modeladas.
Ano_Inicio_F	Vector de año de inicio de las fases modeladas
Onzas_FB	Matriz de parámetros de cantidad de onzas por fase modelada y banco (millones de onzas)
C'ost_Mina_FB	Matriz, de costos por fase modelada y banco (millones de USS)
TonTasaFB	Matriz de parámetro que contempla la división de las toneladas totales entre la tasa de producción por fase modelada y banco
TonFB	Matriz de parámetros de toneladas totales por fase modelada y banco
TonKmFB	Matriz de parámetros de toneladas-kilómetro por fase modelada y banco
Recae_EN	Matriz de parámetros (0 . 1) que indican que fases están reclinadas sobre otras (0 no existe alguna relación de recaer. 1 si existe alguna relación de recaer)
Ba ncoln icio_Recae_EN	Matriz que indica el banco de Inicio de La relación <i>Recae En</i> .
BancoFinalRecaeEN	Matriz, que indica el banco final de la relación <i>Recae En</i> .
OzExistentesF n m	Vector de onzas existentes de las fases no modeladas
Costo_Oz_Fnm	Vector de costo por onza de las fases no modeladas .
AñoInieioFnm	Vector de año de inicio de las fases no modeladas
StripFnm	Vector de strip de las fases no modeladas
RecuperacionFnm	Vector de recuperación de las fases no modeladas
Ley_Fnm	Vector de leyes de las fases no modeladas.
DistanciaPadFnm	Vector de distancia a pad de las fases no modeladas .
Distancia_Bota dero Fnm	Vector de distancia a botadero de las fases no modeladas

4.4.2.- La Función Objetivo

Se ha planteado la necesidad de obtener un plan de minado a largo plazo que nos de un costo mínimo, para tal fin cada uno de los costos totales anuales obtenidos deben ser actualizados, es así que la función objetivo ha sido escogida como:

El Valor Actual Neto (VAN) en función de los costos. Dicha función objetivo debe ser minimizada.

En la función objetivo también se incorpora la penalización por el déficit en el cubrimiento de la demanda, por lo que usamos la variable **Produccion_Faltante_Anual_A(i)**, la que llegará a tomar un valor distinto a cero pero solo si no hay onzas disponibles (para los últimos periodos) o si **NO** se puede producir la cantidad deseada en un año determinado por la tasa de producción de los equipos. Esta variable está penalizada en la función objetivo con pesos distintos de acuerdo al año correspondiente.

$$[OBJ] \text{ MIN} = VAN + \sum_{h=1}^{Nro_Años} (1000 - h * 50) * Produccion_Faltante_Anual_A(h)$$

4.4.3.- Las Restricciones

Calculo del Valor Actual Neto (VAN):

Esta restricción es usada para hallar el Valor Actual Neto en función a los costos anuales que después será minimizada en la función objetivo.

$$\sum_{h=1}^{Nro_Años - 1} (Tot_Costo_A(h+1) / (1 + Tasa_Descuento_Anual(1))^h) +$$

$$Tot_Costo_A(1) = VAN$$

Relación existente entre las variables BANCOS SELEC AF:

$$\mathbf{Bancos_Selec_AF(i,j) \leq Bancos_Selec_AF(i+1,j)}$$

$$\forall i \geq \text{Año_inicio_F}(j) \wedge i < \text{Nro. Años}$$

$$j = 1, 2, \dots, \text{Nro. fases}$$

Observaciones:

- El número de años (Nro. Años) es un parámetro ingresado por el tomador de decisiones, el cual, normalmente, es equivalente el horizonte de vida de la mina.
- El número de fases (Nro. fases), también es otro parámetro, que tendrá un valor igual a la cantidad de fases existentes en la mina.
- El año de inicio de una fase dada (Año_Inicio_F(j)) indica el año dentro del horizonte de planeamiento en que dicha fase (j) puede entrar en operación,

Estas variables indican el número de bancos seleccionados en un año específico, por ejm. si la variable

BANCOS_SELEC_AF(1,J) = 3, esto implica que el primer año se tomarán tres bancos de la fase j.

BANCOS_SELEC_AF(2,J) = 3, esto implica que el segundo año no se tomarán bancos de la fase j

BANCOS_SELEC_AF(3,J) = 9 , esto implica que el tercer año se tomarán seis bancos de la fase j.

En este caso la idea de selección de bancos de las fases es acumulativa.

Selección del banco acumulado en un año específico:

Asigna el valor de $k * Bin_AFB(i,j,k)$ a la variable $Bancos_Selec_AF(i,j)$, mas adelante veremos que en un año y para una fase dada solo se activará una variable binaria Bin_AFB ; si es que dicha fase empieza el año número tres, entonces los dos primeros años no se activaran ninguna de las variables.

$$\sum_{k = Banco_Inicio_F(j)}^{Banco_Finid_F(j)} (k * Bin_AFB(i, j, k)) = Bancos_Selec_AF(i, j)$$

$$\forall i \geq Año_inicio_F(j)$$

$$j = 1,2,3,\dots,Nro.fases$$

Solo se puede seleccionar un banco en el mismo año

Estas ecuaciones obligan a que por cada año, y dada una fase especifica, solo una de las variables Bin_AFB debe ser seleccionada (toma el valor 1).

$$\sum_{k = Banco_Inicio_F(j)}^{Banco_Finid_F(j)} Bin_AFB(i, j, k) \leq 1$$

$$\forall i \geq Año_inicio_F(j)$$

$$j = 1,2,3,\dots,Nro.fases$$

Restricción de fases superiores

Existen casos donde una fase esta completamente sobre otra, esto depende de la manera en que se diseñen dichas fases en un pit dado, cuando esto suceda solo hay que indicar la fase que se encuentra encima y la que estará abajo.

Para este caso la lógica será que primero deben salir todos los bancos de la fase superior para que los bancos de la fase inferior puedan salir.

$$Bin(i, k, l) \leq Bin_AFB(i, j, Banco_Final_F(j))$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, Nro. fases$$

$$\forall k = 1, 2, 3, \dots, Nro. fases$$

$$\forall j \neq k \wedge Encima_De(j, k) = 1$$

$$\forall i \geq Año_Inicio_F(j)$$

Restricción de fases adyacentes

En el gráfico 9 (pagina 48), puede apreciarse que existe cierta porción de la fase 1 adyacente a la fase 2, lo cual implica que:

- Si se extrae un banco de la fase 1, el cual se encuentra en la zona de adyacencia, entonces se podrá extraer el banco de la fase 2 que se encuentra al mismo nivel del extraído en la fase 1.
- Si se extraen todos los bancos de la zona de adyacencia en al fase 1, entonces se podrá extraer cualquier banco de la fase 2.
- Pueden existir varias fases en un solo pit, los que pueden tener varias relaciones entre ellas, se debe conocer en que banco empieza la relación y en cual termina.

$$Bin_AFB(i,k,l) \leq \sum_{m=1}^{m \leq Banco_Final_F(j)} Bin_AFB(i,j,m)$$

$$\forall j = 1,2,3,\dots, Nro.\ fases$$

$$\forall k = 1,2,3,\dots, Nro.\ fases$$

$$\forall j \neq k \wedge Encima_De(j,k) = 1$$

$$\forall i \geq Año_Inicio_F(j)$$

$$\forall l \geq Banco_Inicio_Recae_En(j,k) \wedge l \leq Banco_Final_Recae_En(j,k)$$

$$i \leq Banco_Final_F(k) \quad \sum_{l=Banco_Inicio_Recae_En(j,k)}^{l \leq Banco_Final_F(k)} Bin_AFB(i,k,l) \leq \sum_{m=1}^{m \leq Banco_Final_F(j)} Bin_AFB(i,j,m)$$

$$\forall j = 1,2,3,\dots, Nro.\ fases$$

$$\forall k = 1,2,3,\dots, Nro.\ fases$$

$$\forall j \neq k \wedge Encima_De(j,k) = 1$$

$$\forall i \geq Año_Inicio_F(j)$$

Restricción de producción

Se debe producir mas o igual de lo que se requiere por año:

La ecuación mostrada abajo halla la cantidad de onzas producidas por año y fase y la asigna a la variable *Oz_Producidas_AF(i,j)*, pero solo para el primer año y para aquellas fases modeladas; la siguiente ecuación tiene el mismo objetivo pero a partir del segundo año.

Ecuación para el primer año:

$$\sum_{k = Banco_Inicio_F(j)}^{Banco_Final_F(j)} (Bin_AFB(i, j, k) * Onzas_FB(j, k)) = Oz_Producidas_AF(i, j)$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, Nro.fases$$

$$\forall i = 1 \wedge i \geq Año_inicio_F(j)$$

Ecuación a partir del segundo año:

$$\sum_{k = Banco_Inicio_F(j)}^{Banco_Final_F(j)} Bin_AFB(i, j, k) * Onzas_FB(j, k) -$$

$$\sum_{k = Banco_Inicio_F(j)}^{Banco_Final_F(j)} Bin_AFB(i-1, j, k) * Onzas(j, k) =$$

$$Oz_Producidas_AF(i, j)$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, Nro.fases$$

$$\forall i > 1 \wedge i \geq Año_inicio_F(j), \dots, Nro.años$$

Ecuación de requerimiento de onzas:

La siguiente ecuación mostrada abajo obliga a producir una cantidad de onzas mayor o igual a la cantidad requerida, esto implica las onzas extraídas de las fases modeladas y no modeladas. En esta ecuación se usa la variable **Produccion_Faltante_Anuual_A(i)**, la que llegará a tomar un valor distinto a cero pero solo si no hay onzas disponibles (para los últimos periodos) o si no se puede producir la cantidad deseada en un año determinado por la tasa de producción de los equipos, esta variable esta penalizada en la función objetivo dandole pesos distintos de acuerdo al año en el que se usa.

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro. fases}$$

$$\forall i = 1 \wedge i \geq \text{Año_inicio_F}(j)$$

Ecuación para hallar el costo de mina por año y fase a partir del segundo año:

$$\sum_{k = \text{banco_inicio}(j)}^{\text{banco_final}(j)} \text{Bin_AFB}(i, j, k) * \text{Cost_Mina_FB}(j, k) -$$

$$\sum_{k = \text{banco_inicio}(j)}^{\text{banco_final}(j)} \text{Bin_AFB}(i-1, j, k) * \text{Cost_Mina_FB}(j, k) =$$

$(i-1) \geq \text{Año_inicio_F}(j)$

$$\text{Costo_Mina_AF}(i, j)$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro. fases}$$

$$\forall i > 1 \wedge i \geq \text{Año_inicio_F}(j)$$

El juego de ecuaciones mostrado abajo asigna el valor del costo total de las minas modeladas y no modeladas, además de la inversión a la variable TOT_COSTO_A(i), recordar que los costos de inversión son considerados un año antes.

Ecuación para calcular el costo total anual:

$$\sum_{j=1}^{\text{No.Fases}} \text{Costo_Mina_AF}(i, j) +$$

$i \geq \text{Año_inicio_F}(j)$

$$\sum_{n=1}^{\text{No.Fases.No.Modeladas}} \text{Oz_Extraidas_AFnm}(i, n) * \text{Costo_Oz_Fnm}(n) +$$

$i \geq \text{Año_inicio_Fnm}(n)$

$$\sum_{i < \text{Nro.años}} \text{Inversion_Palas_A}(i+1) = \text{Tot_Costo_A}(i)$$

$$\forall i = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro. años}$$

Restricción de tasa de producción:

La tasa de producción contiene la lógica para verificar al cantidad de bancos correspondientes a un mismo PIT que pueden ser minados como máximo en un año, previamente de acuerdo a la tasa de producción se ha definido la cantidad de bancos que se podrían extraer si actualmente estuviésemos en el banco número n.

Restricción para el primer año.

$$\sum_{k=1}^{\text{Banco_Final_F}(j)} k * \text{Bin_AFB}(i,j,k) \leq \text{Ton_Tasa_FB}(j,1) + \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$i \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$

$$\forall j = 1,2,3,\dots \text{Nro.fases}$$

$$i = 1 \wedge i \geq \text{Año_Inicio_F}(j)$$

Restricción para el resto de años.

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \sum k * \text{Bin_AFB}(i, j, k) -$$
$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \sum k * \text{Bin_AFB}(i-1, j, k) \leq$$
$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \sum \text{Ton_Tasa_FB}(j, k) * \text{Bin_AFB}(i-1, j, k) +$$
$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$\text{Ton_Tasa_FB}(j, k) -$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \sum \text{Ton_Tasa_FB}(j, k) * \text{Bin_AFB}(i-1, j, k) +$$
$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$\text{Banco_Inicio_F}(j) -$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \sum \text{Banco_Inicio_F}(j) * \text{Bin_AFB}(i-1, j, k)$$
$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro. fases}$$

$$i \geq 1 \wedge j \geq \text{Año_Inicio_F}(j)$$

Cálculo del total de toneladas (fases no modeladas):

Se calcula las toneladas de mineral y desmonte al año, producidas por las fases No Modeladas, para lo cual solo se conoce la ley, recuperación y el strip., luego en función a esto, se hallará el total de **Toneladas - Kilometro** de las fases Modeladas y No Modeladas.

Toneladas de mineral por año y fase no modelada:

$$Oz_Extraidas_AFnm(i,j) * 31.1035 / (Ley_Fnm(j) * Recuperacion_Fnm(j)) = Mineral_AFnm(i,j)$$

$$\forall i = Año_inicio_Fnm(j), \dots, Nro.años$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, Nro.fases.no.modeladas$$

Toneladas de desmonte por año y fase no modelada:

$$Mineral_AFnm(i,j) * Strip_Fnm(j) = Desmonte_AFnm(i,j) ;$$

$$\forall i = Año_inicio_Fnm(j), \dots, Nro.años$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, Nro.fases.no.modeladas$$

Cálculo del total de toneladas kilómetros

Fases modeladas

Ecuaciones de Toneladas - Kilómetro para el primer año:

$$\sum_{k = Banco_inicio_F(j)}^{Banco_fin_F(j)} Bin_AFB(i,j,k) * Ton_Km_FB(j,k) = Ton_Km_Producidas_AF(i,j)$$

$$\forall i = 1 \wedge i \geq Año_inicio_F(j), \dots, Nro.años$$

$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, Nro.fases.$$

Ecuaciones de Toneladas – Kilómetro a partir del segundo año:

$$\sum_{K = \text{Banco_inicio_F}(j)}^{\text{Banco_final_F}(j)} \text{Bin_AFB}(i, j, k) * \text{Ton_Km_FB}(j, k) =$$

$$\sum_{(i-1) \geq \text{Año_inicio_F}(j)}^{\text{Banco_final_F}(j)} \text{Bin_AFB}(i-1, j, k) * \text{Ton_Km_FB}(j, k) =$$

$$\text{Ton_Km_Producidas_AF}(i, j)$$

$$\forall i > 1 \wedge i \geq \text{Año_inicio_F}(j), \dots, \text{Nro.años}$$
$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro.fases.}$$

Fases No modeladas

Cálculo de las *Toneladas - Kilómetro* de mineral y desmonte producidas por las fases No Modeladas.

$$\text{Mineral_AFnm}(i, j) * \text{Distancia_Pad_Fnm}(j) +$$
$$\text{Desmonte_AFnm}(i, j) * \text{Distancia_Botadero_Fnm}(j) =$$
$$\text{Ton_Km_AFnm}(i, j)$$

$$\forall i \geq \text{Año_inicio_Fnm}(j), \dots, \text{Nro.años}$$
$$\forall j = 1, 2, 3, \dots, \text{Nro.fases.no.modeladas.}$$

Calculo de las Toneladas – Kilómetro Totales

$$\sum_{j=1}^{Nro.de\ fases} Ton_Km_Producidas_AF(i, j) * 10 +$$

i ≥ Año_inicio_F(j)

$$\sum_{k=1}^{Nro.\ fases\ por\ modalidad} Ton_Km_AFnm(i, k) = Total_Ton_Km_A(i)$$

i ≥ Año_inicio_Fnm(k)

$$\forall i = 1, 2, 3, \dots, Nro.años$$

Las Toneladas - Kilómetro totales en el primer año, no deben exceder la capacidad global inicial del primer año.

$$Total_Ton_Km_A(1) \leq Cap_Inicial_Camiones(1)$$

Calculo de inversión en equipo (camiones)

Inicialización de la capacidad total de los camiones, EL PRIMER año;

$$Cap_Total_Equipo_Camiones_A(1) = Cap_Inicial_Camiones(1)$$

Calculo de las Toneladas – Kilómetro por Exceso o Defecto

Estas ecuaciones nos permite determinar el total de Toneladas-Kilómetro por exceso o defecto para un determinado año con respecto a la capacidad del año anterior.

$$Total_Ton_Km_A(i) - Cap_Total_Equipo_Camiones_A(i-1) =$$

$$Ton_Km_Exceso_Camiones_A(i) - Ton_Km_Defecto_Camiones_A(i)$$

$$\forall i > 1$$

Se actualiza la capacidad total de los equipos (CAMIONES)

$$\begin{aligned} \text{Cap_Total_Equipo_Camiones_A}(i) &= \text{Cap_Total_Equipo_Camiones_A}(i-1) \\ &+ \text{Ton_Km_Exceso_Camiones_A}(i) \end{aligned}$$

$$\forall i > 1$$

Inversión en Equipos (CAMIONES)

$$\begin{aligned} (\text{Ton_Km_Exceso_Camiones_A}(i) / \text{Cap_Individual_Camiones}(1)) * \\ \text{Costo_Camiones}(1) = \text{Inversion_Camiones_A}(i) \end{aligned}$$

$$\forall i > 1$$

Las Toneladas extraídas de las minas no deben exceder un tonelaje máximo

Restricción de Total de Toneladas:

Restricción para el Primer año

$$\begin{aligned} k \leq \text{Rancho_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin_AFB} * \text{Toneladas_FB}(j, k) = \text{Toneladas_AF}(i, j) \\ k \geq \text{Rancho_Inicio_F}(j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} j \geq 6 \wedge j \leq 12 \\ i = \text{Año_Inicio_F}(j) \end{aligned}$$

Restricción a partir del Segundo Año

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin_AFB}(i, j, k) * \text{Toneladas_FB}(j, k) =$$

$$k \geq \text{Banco_Inicial_F}(j)$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin}(\text{AFB}(i-1, j, k) * \text{Toneladas_FB}(j, k) =$$

$$k \geq \text{Banco_Inicial_F}(j)$$

$$\text{Toneladas_AF}(i, j)$$

$$j \geq 6 \wedge j \leq 12$$

$$i > \text{Año_Inicio_F}(j)$$

Restricción de Total de Toneladas:

Restricción para el primer año

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin_AFB} * \text{Toneladas_FB}(j, k) = \text{Toneladas_AF}(i, j)$$

$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$j \geq 15 \wedge j \leq 16$$

$$i = \text{Año_Inicio_F}(j)$$

Restricción a Partir del Segundo Año.

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin_AFB}(i, j, k) * \text{Toneladas_FB}(j, k) =$$

$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$k \leq \text{Banco_Final_F}(j) \\ \sum \text{Bin}(\text{AFB}(i-1, j, k) * \text{Toneladas_FB}(j, k) =$$

$$k \geq \text{Banco_Inicio_F}(j)$$

$$\text{Toneladas_AF}(i, j)$$

$$j \geq 15 \wedge j \leq 16$$

$$i > \text{Año_Inicio_F}(j)$$

Restricción de Tonelaje Máximo

$$\sum_{j=6}^{j=12} \text{Toneladas_AF}(i, j) \leq \text{Ton_Max_Permitido}(1)$$

$$i = 1, \dots, \text{Nro. Años}$$

$$\sum_{j=15}^{j=16} \text{Toneladas_AF}(i, j) \leq \text{Ton_Max_Permitido}(1)$$

$$i = 1, \dots, \text{Nro. Años}$$

4.5.- ALCANCES DEL MODELO DE PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

El modelo de planeamiento a largo plazo es el componente principal del SSD, cuyo fin, es apoyar a la gerencia general en la elaboración de los planes de producción a largo plazo y como resultado de esto, apoyar en el planeamiento anual (táctico), así, los alcances del presente modelo son descritos abajo:

- 1. Apoyar en la generación del plan óptimo de producción a largo plazo, de acuerdo a metas anuales, que contemple el mínimo Valor Actual Neto (VAN) en función de los costos.*
- 2. Apoya, en el nivel táctico de planeamiento, proporcionando la secuencia óptima de extracción de bancos para cada uno de los años del horizonte de vida de la misma. Esta secuencia de extracción de bancos esta disponible para totales de cada una de las minas, cada una de las fases y especificado por el código de cada uno de los bancos.*

3. Apoya a la Gerencia General en la construcción del plan óptimo de costos e inversión por mina y por año. Esto implica, los costos en adquisición de equipos (camiones, palas y perforadoras) e inversión en infraestructura (construcción de pads, botaderos y carreteras).
4. Establece un plan óptimo de envío de mineral y desmonte a sus respectivos destinos (pad's y botaderos) considerando costos, distancias y capacidades.

CAPITULO V

IMPLEMENTACION DEL MODELO

5.1. - LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO IMPLEMENTADOS

Como indicamos en el capítulo III, el subsistema de modelos está formado por cuatro modelos, de los cuales el de planeamiento a largo plazo ha sido descrito en el capítulo IV.

Este modelo, tiene dos variaciones que detallamos a continuación:

- El modelo de planeamiento a largo plazo sin considerar la inversión en camiones (Modelo Sin Inversión en Camiones).
- El modelo de planeamiento a largo plazo que considera la inversión en camiones (Modelo con Inversión en Camiones).

Modelo Sin Inversión en Camiones

Este modelo halla la secuencia óptima de minado, indicando los bancos que deberán ser minados en un año específico y la fase a la que corresponde.

Modelo con Inversión en Camiones

Este modelo nos da la secuencia óptima de minado también, pero, adicionalmente considera la inversión en equipos (camiones), el cual incluye dicha inversión un año antes. Cabe recalcar que la secuencia de extracción hallada por este modelo siempre es distinta a la del primero.

A continuación detallaremos la cantidad de bancos y fases por mina considerado, la información geológica, costos y parámetros usados en el modelo, la cantidad de variables generadas en el modelo y las posibilidades de análisis de escenarios.

5.2. - CANTIDAD DE BANCOS Y FASES POR MINA CONSIDERADOS

Una cantidad elevada de fases y bancos existentes en la mina, asociado al horizonte de planeamiento deseado hacen que el tiempo de ejecución de los modelos sea mayor.

A medida que se disminuya uno de estos factores, el modelo tendrá menos variables binarias y restricciones, por ende se ejecutará con mayor rapidez. La tabla 2, muestra las fases con las que trabajamos y la cantidad de bancos de cada una de estas, recordando que, entre las fases de una misma mina pueden existir relaciones de fases predecesoras y adyacentes (ver gráfico 9 en la página 48), factor que, de acuerdo a las pruebas realizadas inciden en forma drástica en el tiempo de ejecución del modelo.

En el caso de la empresa minera donde se realizó la implementación del presente trabajo, existe una mina en la cual se registraron hasta 13 relaciones del tipo precedente y adyacente las fases, considerando que las relaciones empiezan y finalizan en un determinado nivel de bancos de cada una de las fases. Dichas relaciones deben ser especificadas usando la interface del SSD y son las que contribuyen a que el tiempo de corrida sea más largo. La característica de permitir especificar la existencia de dichas relaciones hace del SSD una herramienta flexible, capaz de asimilar los posibles cambios en el diseño de pit y fases y adaptar su utilización en otras minas de un modo fácil.

Listado de Minas, fases y bancos usados en el modelo de planeamiento.

Mina	Fase	Número de Bancos
Mina I	Fase I	22
	Fase 2	12
	Fase 3	8
	Fase 4	12
Mina 2	Fase 5	32
Mina 3	Fase 6	25
	Fase 7	46
	Fase 8	41
	Fase 9	37
	Fase 10	14
	Fase 11	41

	Fase 12	32
Mina 4	Fase 13	15
Mina 5	Fase 14	23
Mina 6	Fase 15	21
	Fase 16	32
Total	16	327

Tabla 2

53.- INFORMACION GEOLOGICA. COSI OS Y PARAMETROS USADOS EN EL MODELO

El modelo de planeamiento necesita información referente a la composición geológica de cada uno de los bancos, esta información es proporcionada por el subsistema de datos de la empresa. La información geológica usada es listada abajo:

- El nombre de la mina
- El número de fase
- El código de cada banco
- La cantidad de mineral en el banco
- La cantidad de desmonte óxido en el banco
- La cantidad de desmonte argílico en el banco
- 1.a ley (% de oro en el mineral) por cada banco
- El porcentaje de recuperación de mineral de la fase
- La distancia de cada banco a su respectivo destino (pad y botadero)

Los costos mostrados en la tabla 3 son ingresados a través de la interface del SSD (no son los costos reales por cuestiones de confidencialidad), son los utilizados como parámetros y están dados en función de:

S/Ton: Dólares por tonelada

\$/ (Ton-Mineral): Dólares por tonelada de mineral

\$/ (Ton-Desmonte): Dólares por tonelada de desmonte

S/Und: Dólares por unidad de camión

Además de la información de costos que es ingresada a través de la interface, existen parámetros críticos que el usuario debe ingresar, como la Tasa de Actualización a ser usada para el cálculo del VAN, para la cual se ha considerado el valor de 10% y el requerimiento de producción para cada año, dada en onzas.

La información geológica, costos y parámetros que alimentan al modelo de planeamiento determinarán la cantidad de restricciones y variables que este tendrá y por ende el tiempo necesario para ejecutar el modelo.

Costos usados en el modelo.

Parámetro de Costo	Unidad	Valor
Perforación	\$/Ton	0.024
Voladura	\$/Ton	0.023
Carguío	\$/Ton	0.023
Acarreo	\$/Ton	0.023
Procesamiento	\$/Ton-Mineral)	0.023
Inversión en Pad	\$/Ton-Mineral)	0.023
Inversión en Botadero	S/(Ton-Desmote)	0.023
Inversión en camiones (*)	USS/Und.	1.6

Tabla 3

5.4.- CANTIDAD PE VARIABLES DEL MODELO

En el Capítulo I, (sección 1.7.1), analizamos el impacto que tiene la cantidad de variables enteras en el tiempo necesario para solucionar un problema PLE, lo cual es aplicable también a los problemas PLEM.

De toda la información obtenida a través de la interface del SSD para el modelo de planeamiento, las que definen la cantidad de restricciones y variables que tendrá el modelo son:

- La cantidad de fases y bancos y
- La cantidad de años a considerar en el horizonte de planeamiento

Detallaremos la cantidad de restricciones y variables para las dos versiones del modelo de planeamiento a largo plazo (modelo sin inversión y con inversión en camiones)

Modelo sin inversión en camiones

Horizonte de planeamiento:	10 años
Variables reales:	9501
Variables enteras:	4024
Restricciones:	3578

Modelo con inversión en camiones

Horizonte de planeamiento:	10 años
Variables reales:	9981
Variables enteras:	4024
Restricciones:	3869

La cantidad de variables y restricciones que el modelo genera por cada año adicional en el horizonte de planeamiento no varían mucho entre los modelos con inversión y sin inversión en camiones, por lo que damos un promedio (de ambos modelos) del crecimiento en número de variables y restricciones para tener una idea de la magnitud de variables y restricciones a obtener por cada año adicional en el horizonte de planeamiento:

Por cada año adicional en el horizonte de planeamiento tendremos las siguientes variables y restricciones adicionales:

Variables reales:	413
Variables enteras:	998
Restricciones:	397

5.5.- GENERACION DE ESCENARIOS

Bajo la forma tradicional de creación de los planes de producción (usando hojas de cálculo), los ingenieros de planeamiento pueden generar un plan de producción e inversión alternativo en aproximadamente 4 o 5 días, sin que esto implique que el plan generado sea el óptimo. Usando una herramienta como el SSD diseñado para apoyar en la generación de los planes de producción a largo plazo, se pueden generar los planes de producción en aproximadamente 5 horas (como se detalla en el Capítulo VI), con lo cual, las posibilidades de generación de escenarios crecen en forma considerable.

El entorno en el que se ubica a la empresa minera bajo estudio está caracterizado por:

- Los precios fluctuantes del oro
- La empresa forma parte de una corporación internacional con operaciones mineras distribuidas en diversos continentes.
- Los costos de producción de la empresa son uno de los más bajos a nivel internacional.
- Desde hace dos años el precio internacional del oro no es más alto que los costos de producción de algunas minas pertenecientes a dicha corporación.

1. « Se analizan alternativas de demanda más altas, buscando extraer las onzas requeridas al mínimo costo posible de modo que permita financiar o sostener las operaciones internacionales en las minas que forma parte de la corporación y que tienen un costo de producción alto, hasta que los precios del oro suban, pues el hecho de cerrar dichas operaciones implica perder recursos humanos claves, costos de oportunidad y otras consideraciones técnicas.

2 - El entorno político define el nivel de confianza de los inversionistas, quienes tratarán de buscar un equilibrio entre la inversión a realizar en equipos (camiones, palas, perforadoras, entre otros) e infraestructura y las utilidades considerando el

tiempo en que realizaran dichas operaciones (dependiendo del entorno político) y los niveles de reinversión.

Como podemos ver, el horizonte de planeamiento y la demanda son definidos por los accionistas de la empresa, quienes tienen que velar por el buen desempeño de una organización mucho más amplia, de la cual la empresa minera bajo estudio forma parte, es así que, dada una demanda para un horizonte de planeamiento determinado, se analiza cual es la mejor ruta de acción.

CAPITULO VI

RESULTADOS DEL MODELO

6.1.- PRELIMINARES

- Los requerimiento de producción son ingresados para cada arto del horizonte deseado, para el caso de la empresa donde se implementó el SSD, el requerimiento está en el orden de los millones de onzas, que por motivos de confidencialidad de datos no son mostrados.
- Se debe considerar que los valores de las onzas y tonelajes obtenidos por arto en el planeamiento optimizado difieren mínimamente del requerimiento original (en el caso de las onzas) debido a la escala y al factor de redondeo manejadas internamente por la interface del SSD y que son transparentes al usuario. Estas pequeñas desviaciones por defecto o exceso no alteran los resultados, son despreciables para fines de obtener un planeamiento a largo plazo. Este redondeo trae como consecuencia bajar el tiempo de procesamiento de CPU.
- Los modelos analizados consideran la restricción de tonelaje máximo por año en dos de las minas, se debe tener en cuenta que los planes generados en forma tradicional (usando hoja de cálculo) no consideran tales restricciones ver las tablas 4, 5 y el gráfico 10 más adelante.
- Para poder resolver el modelo planteado se ha seleccionado el software de optimización LINGO, del fabricante de software LINDO Systems. Inc. LINGO nos permite leer y guardas información desde y hacia bases de datos o archivos de texto externos, así como, crear una estructura flexible del modelo (pues este crece o se reduce en el número de variables y restricciones). El usuario solo debe ingresar ciertos parámetros a través de la interface del SSD, los cuales son utilizados por LINGO para generar el modelo que posteriormente resolverá.

6.2. - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Modelo Sin Inversión en Camiones:

Este modelo se corrió para un horizonte de planeamiento de 10 **arios**, considerando los requerimientos de los planes de producción convencionales.

Los resultados obtenidos del *planeamiento optimizado* son comparados con los resultados del plan convencional. De la Tabla-4 de comparación del plan optimizado y convencional, podemos observar que la diferencia en el VAN es de US\$ 92'864'512 (9.01%) a favor del planeamiento optimizado (ahorro).

1 *ja* diferencia en el costo por año de los planes, se ve más amplia en los años:

2*001 con US\$ 38'620,339 (20.39%) de ahorro a favor del planeamiento optimizado.

2.6 con US\$ 36'481,888 (21.18%) de ahorro a favor del planeamiento optimizado.

2.7 con US\$ 101'171,850 (71.13%) de ahorro a favor del planeamiento optimizado.

Estos porcentajes son con respecto a los costos del modelo convencional.

Observación: Si la comparación del *planeamiento convencional* versus el *planeamiento optimizado* incluyen los costos de inversión en camiones posterior a la corrida del modelo, la diferencia en el VAN vana en US\$ 99'503,553 (9.08%) a favor del planeamiento optimizado (Ver la Tabla - 5)

El cálculo de inversión en camiones se realiza para un camión de capacidad de 150 Toneladas, con una productividad de 6'100,000 TMSxKm/Año. y un costo individual de US\$ 1 '600,000.

PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

CUADRO DE COMPARACION PLANEAMIENTO 1998-2007

Resultado del modelo optimizado sin inversión en camiones, incluye restricción de tonelaje máximo, cálculo de la inversión en camiones posterior a la comida

Requerimiento (Onzas):

VAN

Convencional	\$1,096,420,382
Optimizado	\$996,916,829
Diferencia	\$99,503,553

0.090763104

Año 1,998	Año 1,999	Año 2,000	Año 2,001	Año 2,002
900,000	1'300,000	1'300,000	1'300,000	1'300,000
Año 2,003	Año 2,004	Año 2,005	Año 2,006	Año 2,007
1'300,000	1'300,000	1'300,000	1'100,000	700,000

Comparación	Año 1,998		Año 1,999		Año 2,000		Año 2,001	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	900,000	920,968	1,300,000	1,295,901	1,300,000	1,317,621	1,300,000	1,294,561
Mitral (Tas)	25,749,000	21,275,398	46,161,000	43,659,294	54,341,000	50,314,409	71,482,000	64,685,464
Desmonte (Tas)	21,126,000	15,090,119	37,339,000	37,615,744	33,159,000	42,264,052	40,018,000	24,639,553
Tot. Tons.	46,875,000	36,365,517	83,500,000	81,275,038	87,500,000	92,578,461	111,500,000	89,325,017
Acuerzo (Tas-Km)	110,047,633	71,429,510	259,826,563	241,121,845	302,679,733	284,269,659	403,021,722	291,216,776
Cost. Prod. (Tas)	\$66,333,172	\$49,800,218	\$129,702,496	\$123,345,503	\$145,100,939	\$142,579,737	\$189,396,639	\$150,776,300
Camiones alquilar	0.0	0.0	15.5	12.5	7.0	7.1	16.4	1.1
Inv. en Camiones	0	0	24,867,295	19,001,140	11,240,176	11,317,460	26,319,210	1,822,195
Costo Total	\$91,200,467	\$69,761,358	\$140,942,672	\$134,662,962	\$171,420,149	\$144,401,931	\$189,396,639	\$163,321,048

Comparación	Año 2,002		Año 2,003		Año 2,004		Año 2,005	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	1,300,000	1,302,184	1,300,000	1,291,421	1,300,000	1,305,235	1,300,000	1,345,498
Mitral (Tas)	71,345,000	69,780,894	73,875,000	83,512,447	73,181,000	84,372,950	59,987,000	77,200,766
Desmonte (Tas)	40,155,000	31,645,026	37,623,000	39,464,788	38,319,000	60,101,520	51,513,000	32,133,207
Tot. Tons.	111,500,000	101,425,920	111,498,000	122,977,236	111,500,000	144,474,471	111,500,000	109,333,973
Acuerzo (Tas-Km)	353,650,409	339,043,629	411,832,078	381,686,321	459,205,007	447,210,339	334,598,332	362,829,183
Cost. Prod. (Tas)	\$180,521,947	\$170,359,738	\$192,476,197	\$200,610,405	\$200,471,201	\$226,909,032	\$169,951,286	\$184,449,281
Camiones alquilar	0.0	7.8	1.4	7.0	7.8	10.7	0.0	0.0
Inv. en Camiones	0	12,544,748	2,310,913	11,184,968	12,425,686	17,186,028	0	0
Costo Total	\$182,832,800	\$181,544,706	\$204,901,884	\$217,797,033	\$200,471,201	\$226,909,032	\$169,951,286	\$184,449,281

Comparación	Año 2,006		Año 2,007	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	1,100,000	1,067,161	700,000	709,460
Mitral (Tas)	64,722,000	52,017,549	45,432,000	16,798,440
Desmonte (Tas)	46,451,000	29,568,304	54,153,000	6,435,782
Tot. Tons.	111,173,000	81,585,854	99,585,000	23,234,222
Acuerzo (Tas-Km)	331,566,600	279,770,000	274,030,564	86,139,715
Cost. Prod. (US\$)	\$172,192,081	\$135,710,193	\$142,225,258	\$41,053,407
Camiones alquilar	0.0	0.0	0.0	0.0
Inv. en Camiones	0	0	0	0
Costo Total	\$172,192,081	\$135,710,193	\$142,225,258	\$41,053,407

CAMIONES		
Descripción:	Camión 150 Tn	
Productiv. (TMS/Km Año):	8'100,000	
Costo (US\$UND):	\$ 1'600,000	
TOTAL		
Convencional	Optimizado	Diferencia
48,23	46,26	1,97
77,163,280	74,017,138	3,146,142

TABLA 5

PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

CUADRO DE COMPARACION - PLANEAMIENTO 1998-2007

(Resultado del modelo optimizado sin inversión en camiones, incluye restricción de tonelaje máximo)

Requerimiento (Onzas):

VAN		Año 1,998					Año 1,999					Año 2,000					Año 2,001					Año 2,002				
Convencional	1,030,289,574																									
Optimizado	\$937,425,061																									
Diferencia	\$92,864,512																									

9.01%

Comparación	Año 1,998		Año 1,999		Año 2,000		Año 2,001	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	900,000	920,968	1,300,000	1,295,901	1,300,000	1,317,621	1,300,000	1,294,561
Mineral (Tns)	25,749,000	21,275,398	46,161,000	43,659,294	54,341,000	50,314,409	71,482,000	64,685,464
Desmonte (Tns)	21,126,000	15,090,119	37,339,000	37,615,744	33,159,000	42,264,052	40,018,000	24,639,553
Tot. Tons.	46,875,000	36,365,517	83,500,000	81,275,038	87,500,000	92,578,461	111,500,000	89,325,017
Acarreo (Tns-Km)	110,047,633	71,429,510	259,826,563	241,121,845	302,679,733	284,269,659	403,021,722	291,216,776
Cost (US\$)	66,333,172	49,808,218	129,702,496	123,345,503	145,100,939	142,579,737	189,396,639	150,776,300
Difer. Costo (US\$)	\$16,532,954		\$6,356,994		\$2,521,202		\$38,620,339	

Comparación	Año 2,002		Año 2,003		Año 2,004		Año 2,005	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	1,300,000	1,302,184	1,300,000	1,291,421	1,300,000	1,305,235	1,300,000	1,345,498
Mineral (Tns)	71,345,000	69,780,894	73,875,000	83,512,447	73,181,000	84,372,950	59,987,000	77,200,766
Desmonte (Tns)	40,155,000	31,645,026	37,623,000	39,464,788	38,319,000	60,101,520	51,513,000	32,133,207
Tot. Tons.	111,500,000	101,425,920	111,498,000	122,977,236	111,500,000	144,474,471	111,500,000	109,333,973
Acarreo (Tns-Km)	353,650,409	339,043,629	411,832,078	381,686,321	459,205,007	447,210,339	334,598,332	362,829,183
Cost (US\$)	180,521,947	170,359,738	192,476,197	200,610,405	200,471,201	226,909,032	169,951,286	184,449,281
Difer. Costo (US\$)	\$10,162,210		-\$9,134,208		-\$26,437,831		-\$14,497,995	

Comparación	Año 2,006		Año 2,007	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Onzas	1,100,000	1,067,161	700,000	709,460
Mineral (Tns)	64,722,000	52,017,549	45,432,000	16,798,440
Desmonte (Tns)	46,451,000	29,568,304	54,153,000	6,435,782
Tot. Tons.	111,173,000	81,585,854	99,585,000	23,234,222
Acarreo (Tns-Km)	331,566,600	279,770,000	274,030,564	86,139,715
Cost (US\$)	172,192,081	135,710,193	142,325,250	41,053,407
Difer. Costo (US\$)	\$36,481,888		\$101,171,850	

TABLA 4

Modelo Con Inversión en Camiones:

Este modelo se corrió para un horizonte de planeamiento de **10 años (1,998 - 2,007)**, considerando los requerimientos de producción del plan convencional.

Los resultados obtenidos del *planeamiento optimizado* son comparados con los resultados del *planeamiento convencional*. De la Tabla-6 de comparación podemos observar la diferencia en el VAN de TSS 90*607,167 (8.26%) a favor del planeamiento optimizado (ahorro).

Se tomó como parámetros los siguientes:

Un camión de capacidad de 150 Toneladas

Una productividad del camión de 6'100,000 TMS x Km/Año, y

Un costo individual de cada camión de USS 1'600,000.

Para este análisis podemos observar que el *Plan convencional* llegará a comprar

48.23 camiones y se necesitará una inversión de **USS 77'163,280**, mientras que el *planeamiento optimizado* implicará adquirir **35.86** camiones y una inversión de **USS 57'380,002**, dando una diferencia de **12.36** camiones y un ahorro de **USS 19'783,278** a favor del *planeamiento optimizado*.

En el gráfico-10, se puede observar que la cantidad de toneladas a extraer algunos años de las minas 3 y 6 exceden el tonelaje máximo permitido para cada mina, que es un parámetro fijado en 60'000,000 de toneladas, así:

De acuerdo al plan convencional, la mina 6 debe producir 70'018,000 de toneladas el año 2,002, excediendo el tope permitido.

También de acuerdo al plan convencional la mina 3, debe producir 80000,000 de toneladas los años 2,006 y 2,007, excediendo el tope permitido.

En cambio, en el plan optimizado no se supera el tope máximo de toneladas a extraer cada año de cada una de las fases.

PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

CUADRO DE COMPARACION - PLANEAMIENTO 1998 - 2007

(Resultado del modelo optimizado con inversión en camiones, incluye restricción de tonelaje máximo)

Requerimiento (Tonas):

VAN

Convencional	\$1,096,420,382
Optimizado	\$1,005,813,215
Diferencia	\$90,607,167

Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
900,000	1,300,000	1,300,000	1,300,000	1,300,000

Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007
1,300,000	1,300,000	1,300,000	1,100,000	700,000

Comparación	Año 1998		Año 1999		Año 2000		Año 2001	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Costos	900,000	933,731	1,300,000	1,290,510	1,300,000	1,305,187	1,300,000	1,297,665
Mineral (Tne)	25,749,000	21,871,746	46,161,000	44,115,750	54,341,000	54,081,275	71,482,000	67,639,147
Diamante (Tne)	21,126,000	19,471,780	37,339,000	32,608,280	33,159,000	42,265,598	40,018,000	9,382,488
Tot. Tons	46,875,000	41,343,526	83,500,000	76,724,030	87,500,000	96,346,873	111,500,000	97,866,312
Acarreo (Tne-Km)	110,047,633	109,887,215	259,826,563	226,013,404	302,679,733	279,684,797	403,021,722	319,842,208
Cost. Prod. (US\$)	66,333,172	60,258,347	129,702,496	117,986,571	145,100,939	146,594,135	189,396,639	163,331,326
Camiones adquire	0	0	16	10	7	9	16	7
Inv. en Camiones	0	0	24,867,295	15,998,270	11,240,176	14,077,743	26,319,210	10,533,091
Costo Total	91,200,467	76,256,617	140,942,672	132,064,314	171,420,149	157,127,227	189,396,639	168,371,714

Comparación	Año 2002		Año 2003		Año 2004		Año 2005	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Costos	1,300,000	1,301,011	1,300,000	1,310,028	1,300,000	1,302,645	1,300,000	1,317,154
Mineral (Tne)	71,345,000	70,209,084	73,875,000	81,297,673	73,181,000	77,420,693	59,987,000	83,377,065
Diamante (Tne)	40,155,000	15,469,142	37,623,000	21,649,470	38,319,000	16,784,468	51,513,000	17,243,347
Tot. Tons	111,500,000	101,393,092	111,498,000	120,436,876	111,500,000	119,578,170	111,500,000	119,038,213
Acarreo (Tne-Km)	353,650,409	339,058,687	411,832,078	381,331,988	459,205,007	383,591,500	334,598,332	383,781,258
Cost. Prod. (US\$)	180,521,947	170,607,126	192,476,197	197,491,530	200,471,201	194,948,123	169,951,286	198,390,543
Camiones adquire	0	3	1	7	8	0	0	0
Inv. en Camiones	0	5,040,388	2,310,913	11,088,079	12,425,686	592,659	0	49,773
Costo Total	182,832,860	181,695,205	204,901,884	198,084,189	200,471,201	194,997,896	169,951,286	198,390,543

Comparación	Año 2006		Año 2007	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
Costos	1,100,000	1,092,289	700,000	709,039
Mineral (Tne)	64,722,000	52,626,989	45,432,000	21,124,954
Diamante (Tne)	46,451,000	26,400,435	54,153,000	16,862,502
Tot. Tons	111,173,000	92,492,801	99,585,000	37,987,456
Acarreo (Tne-Km)	331,566,600	292,918,351	274,030,564	134,027,378
Cost. Prod. (US\$)	172,192,081	145,584,917	142,225,258	61,901,803
Camiones adquire	0	0	0	0
Inv. en Camiones	0	0	0	0
Costo Total	172,192,081	145,584,917	142,225,258	61,901,803

CAMIONES	
Descripción:	Camión 150 Tn
Productiv. (TMSxKm/Año):	6'100,000
Costo (US\$/UND):	\$ 1'600,000

TOTAL		
Convencional	Optimizado	Diferencia
48.23	35.86	12.36
\$77,163,280	\$57,380,002	\$19,783,278

TABLA 6

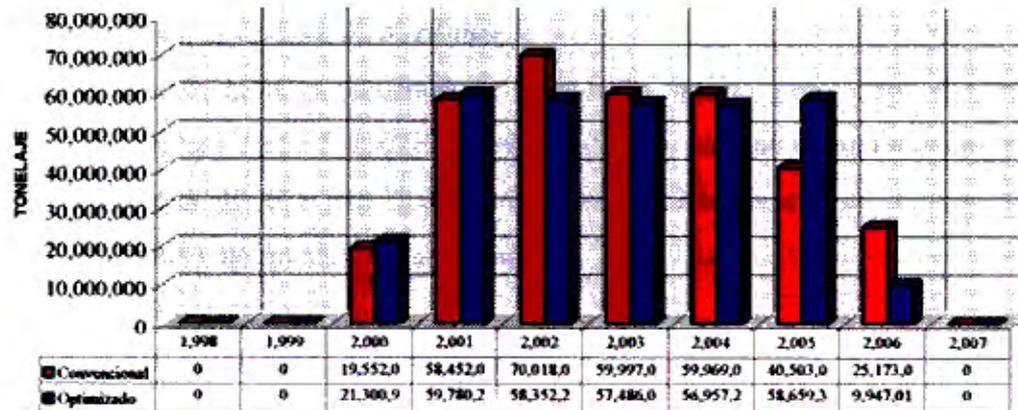
PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO

Modelo Optimizado con Inversión en camiones, incluye restricción de tonelaje máximo

Mina 6 Tonelaje Máximo permitido = 60'000,000

	1,998	1,999	2,000	2,001	2,002	2,003	2,004	2,005	2,006	2,007
Convencional	0	0	19,552,000	58,452,000	70,018,000	59,997,000	59,969,000	40,503,000	25,173,000	0
Optimizado	0	0	21,300,966	59,780,262	58,352,203	57,486,076	56,957,218	58,659,325	9,947,012	0

TONELAJE TOTAL - MINA 6
Tonelaje Máximo Permitido 60'000,000



Mina 3 Tonelaje Máximo permitido = 60'000,000

	1,998	1,999	2,000	2,001	2,002	2,003	2,004	2,005	2,006	2,007
Convencional	9,222,000	22,412,000	25,016,000	38,362,000	29,482,000	39,501,000	51,531,000	59,272,000	80,000,000	80,000,000
Optimizado	1,226,600	21,653,609	27,834,675	35,081,251	34,404,021	27,292,048	53,585,864	47,415,990	57,799,662	37,987,456

TONELAJE TOTAL - MINA 3
Tonelaje Máximo Permitido 60'000,000

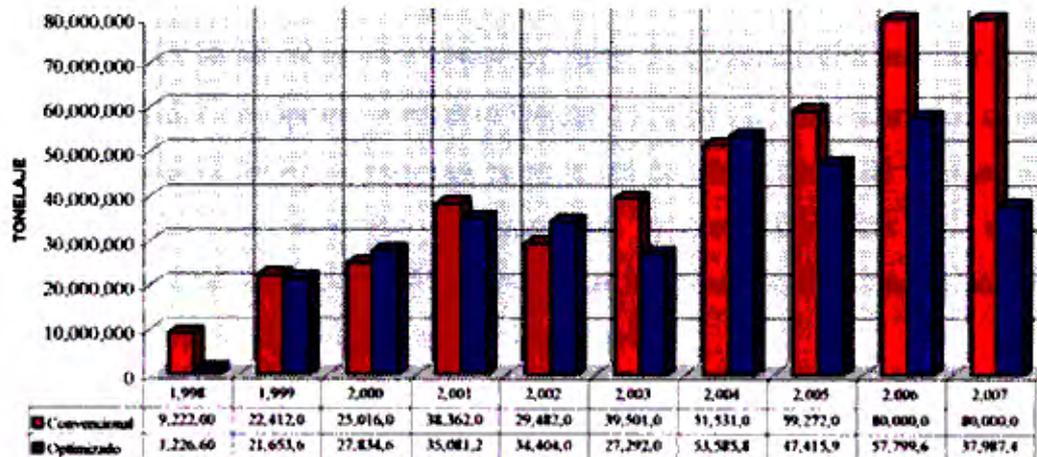


GRAFICO 10

6.3 - TIEMPO DE EJECUCION DE LOS MODELOS

Dependiendo de los datos ingresados y el tipo de computadora que se utilice, los tiempos de ejecución son bastante variables. A continuación damos algunos índices de desempeño de los modelos descritos en este trabajo. Todos estos modelos se ejecutaron en una computadora 586 con 400 MHZ y 128 MB RAM.

Modelo sin inversión en camiones

Este modelo halla la secuencia de extracción óptima, pero, tiene el tiempo de ejecución más corto. Dependiendo de los datos y parámetros del modelo, para un horizonte de 10 años este demora en promedio 3 horas, con un mínimo de 1 hr. 35 minutos y un máximo de cinco horas.

Modelo con inversión en camiones

Generalmente tiene un tiempo de ejecución rápido para un horizonte de 7 u 8 años (alrededor de 5 hrs.de ejecución), pero cuando se usa un horizonte más amplio (9 o 10 años), demora en promedio 33 hrs. Esto puede ampliarse, dependiendo de los datos y los requerimientos usados en el modelo.

En ambos casos, mencionamos una demora promedio, debido a que dadas ligeras modificaciones en los valores correspondientes a parámetros o información geológica, el tiempo necesario para llegar a un óptimo varía en forma impredecible, dentro de los rangos comentados arriba.

Además los óptimos obtenidos tienen un rango de tolerancia con un error de $\pm 5\%$ y $\pm 7\%$ alrededor del óptimo verdadero (logrado a través de una heurística disponible en el software LINGO, la cual nos permite definir dicho rango de tolerancia), para los modelos sin inversión en camiones y con inversión en camiones, respectivamente, esto, con el fin de aumentar la velocidad de solución del modelo, dado el algoritmo de solución usado (ver anexo II)

6.4.- VALIDACION DEL MODELO

El proceso de validación del modelo es lento y cuidadoso, pues se tienen muchas variables, criterios y restricciones que verificar y hay que realizarlo en forma permanente durante todo el proceso de construcción del modelo hasta obtener la versión final, etapa en la que la validación es más rigurosa.

Una vez construido el modelo se procedió a realizar pruebas de sensibilidad del mismo, esto implicaba, modificar algunos coeficientes y verificar si el modelo respondía como se esperaba, obteniendo un resultado favorable.

Luego, se trabajó en forma conjunta con los ingenieros de planeamiento de la mina, esto implicó verificar si los resultados arrojados por el modelo son factibles de implementarse en la práctica, esta labor fue realizada por los ingenieros de planeamiento.

El análisis de costos obtenidos también fue verificado con el fin de poder realizar una comparación con los planes de producción que se realizaban en forma tradicional.

Al final, se entregan resultados de planes generados por el modelo y planes generados en la forma tradicional a diferentes ingenieros de planeamiento, sin indicarles el origen de los mismos y que traten de determinar las explicaciones de las diferencias encontradas, y usando esta información para tratar de determinar la existencia de algún error en el modelo. Después de haber realizado las labores de validación, todos los participantes del proyecto aprobaron la versión final del modelo.

Esta, no es una actividad que se realice en forma recurrente, pues una vez validado el modelo, estamos seguros del buen desempeño del modelo frente a cambios en parámetros e información geológica.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

1. La utilización del SSD desarrollado e implementado, cuyo fin principal es apoyar en la generación de los planes de producción e inversión a largo plazo, considerando minimizar el valor actual neto en función a los costos, permite obtener alternativas de planeamiento e inversión mucho mejores a los planes de producción generados en forma tradicional, esto es, usando una hoja de cálculo.
2. El tiempo requerido para generar los planes de producción a largo plazo, haciendo uso del SSD, es mucho más corto (en promedio 3 horas, para el modelo que no considera la inversión en camiones) que en el método tradicional usando una hoja de cálculo, puesto que, el tiempo requerido para implementar una modificación en los planes de producción existentes, requiere alrededor de dos semanas y aun así, no nos garantiza la generación de un plan óptimo. Se espera que a medida que las computadoras sean más rápidas, el tiempo de ejecución de los modelos usados sea más corto.
3. Una de las ventajas adicionales en la utilización del SSD es que los resultados obtenidos, luego de ejecutar los modelos de optimización, pueden ser presentados en diversas modalidades, dependiendo del usuario que necesite dicha información, así por ejemplo, si los usuarios son el gerente general y los superintendentes de planeamiento y mina, está disponible un informe resumido anual (gerencial) de los planes de producción e inversión, similar al mostrado en el anexo 1. En forma adicional, los ingenieros encargados de la implementación de dichos planes, tienen a disposición reportes detallados por cada año, mina y fase, de los bancos a ser extraídos. Los resultados generados por el SSD, son un componente primordial para la elaboración de los planes estratégicos de la empresa minera, en la cual se consideran factores adicionales como financieros, disponibilidad de recursos, entre

otros.

4. El SSD creado para generar los planes de producción es una herramienta que apoya a los ingenieros de planeamiento a realizar su labor. Este, puede ser adaptado a diferentes condiciones como:

- Cantidad de minas, fases y bancos
- Composición geológica de la mina
- Distancias a pad's y botaderos
- Año de inicio de explotación de la mina
- Relaciones existentes entre las fases que definen si una fase esta recostada en otra fase o encima de la misma, entre otros.

Todas estas condiciones de la mina pueden representarse modificando los parámetros definidos en la interface, los cuales son considerados para armar el modelo, justo antes de su ejecución en la memoria de la computadora. Si se implementa dicho sistema para ser usado en otras minas de características completamente distintas e incluso, trabajando con otro mineral se pueden implementar ligeras modificaciones en forma rápida, debido al esquema de conjuntos e índices usado por el software LINGO para crear las restricciones.

5. La función objetivo a optimizar es el valor actual neto de los costos, debido a que, el precio de comercialización internacional del oro es muy fluctuante. Pero dados los requerimientos se podrían plantear funciones objetivo diversas como el valor actual neto, ahora sí, en función del valor de venta menos el costo de producción, las mismas que podrían ser seleccionadas desde la interface del SSD por el usuario y que afectarían en forma directa y automática al modelo.

6. No existe la posibilidad de hacer un análisis de sensibilidad para el modelo de planeamiento a largo plazo, pues este es de tipo entero mixto. La única posibilidad es correr el modelo otra vez con diferentes parámetros para comparar los resultados. Esta limitación no genera mayores problemas, puesto que, en la

forma tradicional de generación de planes de producción, la demora fluctúa alrededor de las dos semanas, mientras que usando el modelo, demoramos en promedio tres horas y obtenemos resultados óptimos

7. Los resultados óptimos obtenidos por el modelo de planeamiento tienen un rango de tolerancia con un error de $\pm 5\%$ y $\pm 7\%$ alrededor del óptimo verdadero, para los modelos sin inversión en camiones y con inversión en camiones, respectivamente, esto, con el fin de aumentar la velocidad de solución del modelo, dado el algoritmo de solución usado (ver anexo II). Dicho rango de tolerancia es una heurística implementada en el software LINGO usado para resolver el modelo matemático y cuyo rango de tolerancia puede ser definido al antojo del usuario.

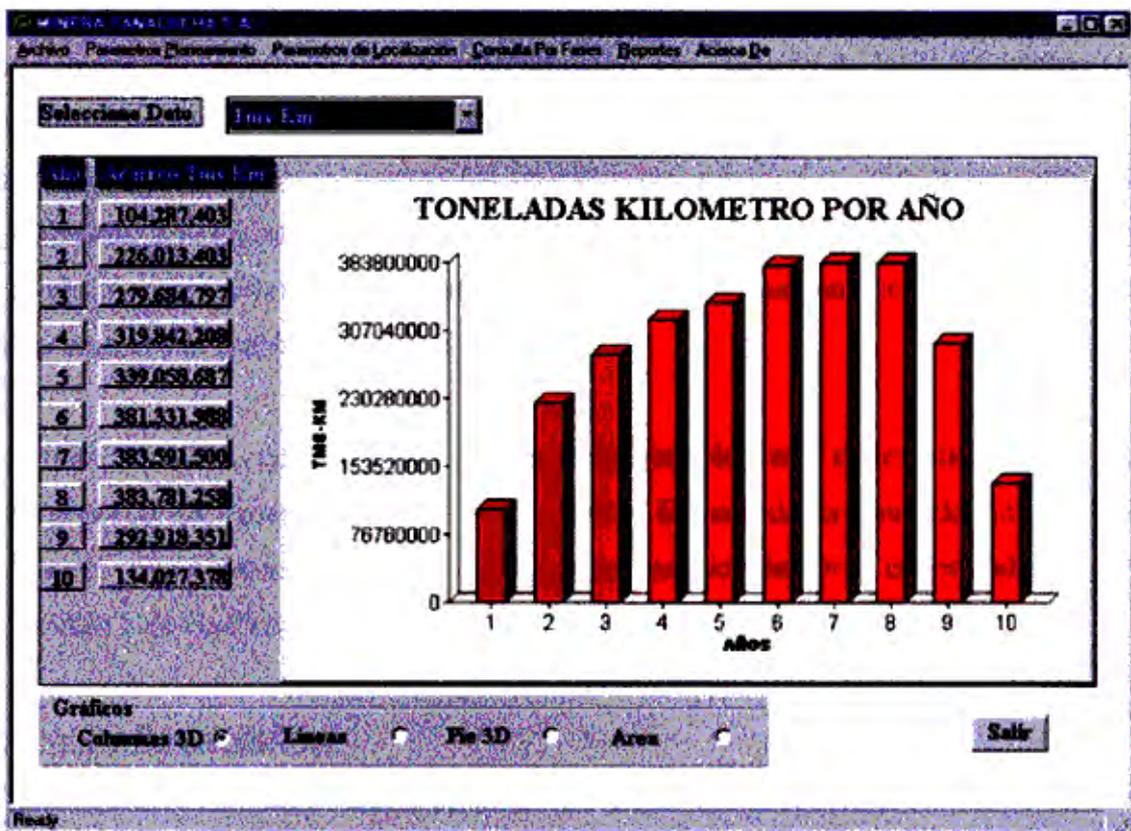
RECOMENDACIONES

1. Utilizar el SSD pues con esta herramienta se obtienen mejores resultados que usando una hoja de cálculo y en menos tiempo.
2. Mejorar la metodología actual para el cálculo de los costos, de modo que se pueda obtener información más precisa en dichos parámetros.
3. Actualizar la configuración de las computadoras donde se ejecutan los modelos tan pronto como se encuentren disponibles en el mercado computadoras con mayor velocidad de procesamiento, con el fin de lograr una disminución en el tiempo de ejecución de dichos modelos.
4. Capacitar al personal encargado de manejar el sistema y al staff de gerencia en el uso de técnicas de Investigación Operativa para lograr nuevas aplicaciones basadas en estas técnicas y un entendimiento más amplio de sus bondades.

ANEXO 1

EJEMPLO DE REPORTE GENERADO POR LA INTERFASE DE USUARIO.

El reporte de planeamiento gráfico, permite al usuario visualizar gráficamente el comportamiento de las onzas a extraer por año, el costo de producción por año, el costo total por año, el total de toneladas por año, y el acarreo por año, el ejemplo mostrado abajo es el relativo a las toneladas kilometro (cantidad de kilómetros que se desplazarán los camiones para mover el tonelaje total de mineral) necesarias para cumplir con los planes de producción.



**Gráfico 11 - Uno de los reportes generados por el SSD
Total de toneladas Kilometro**

ANEXO 2

ALGORITMOS DE SOLUCION PE LOS MODELOS DE PROGRAMACIÓN ENTERA (PLE).

En esta sección no tratamos de hacer una descripción completa de los algoritmos de Programación Entera, en su lugar indicaremos diferentes modos en los cuales los modelos de Programación Entera pueden ser resueltos

Método de Planos Cortantes

Estos métodos pueden ser aplicados a problemas de programación entera mixta (PLE). Estos usualmente comienzan resolviendo un problema de programación entera (PLE) como si este fuera un problema de Programación Lineal (PL), añadiendo los requerimientos de integralidad. Si la solución de la PL resultante (el óptimo continuo) es entero, la solución será además el Óptimo entero. En otro caso, se adicionarán en forma sistemática restricciones adicionales (planos cortantes) al problema, restringiéndolo más. La nueva solución del problema más restringido puede o no ser entero. Continuando el proceso hasta que una solución entera sea encontrada o el problema muestre ser infactible.

Aunque el método de planos cortantes aparente una elegancia matemática regular, no ha probado ser exitoso en problemas grandes. El método original de este tipo es descrito por Gomory (1958).(5) Referencias adicionales son encontradas en el capítulo 5 de Garfinkel y Nemhauser (1972) (5).

Métodos Enumerativos

Estos son generalmente aplicados a la clase especial de problemas 0 - 1 de Programación Lineal Entera Pura (PLEP). En teoría, hay solamente un número finito (aunque extremadamente largo) de soluciones posibles para un problema de esta clase.

Aunque puede ser prohibitivo examinar todas estas posibilidades, mediante el uso de un árbol de búsqueda es posible examinar solo algunas soluciones y con reglas sistemáticas

eliminar muchas otras que sean infactibles o no óptimas. Estos métodos junto con sus variantes y extensiones han probado ser muy exitosos con ciertos tipos de problemas y no muy exitosos en otros. Existen programas comerciales para tales métodos, pero no son ampliamente usados. El mejor método conocido de estos es el "Algoritmo Aditivo de Balas", descrito por Balas (1965). Otros métodos son dados por Geoffrion (1969).

Métodos "Branch and Bound"

Son estos métodos los que han probado más éxito en general en problemas prácticos (PLEM). Como con los métodos de planos cortantes, el problema es resuelto primero como un problema PL relajando las condiciones de integralidad. Si la solución resultante (el óptimo continuo) es entero, el problema está resuelto. En otro caso, creamos un árbol de búsqueda. El procedimiento es mejor entendido usando un ejemplo concreto. Después, describiremos más rigurosamente el método general. Un modelo PLEM con las siguientes dimensiones ha sido resuelto:

- 71 restricciones
- 25 variables continuas
- 40 variables enteras 0 - 1

Las variables 0 - 1 serán referenciadas en la descripción y son denotadas por d_i y y_t^* , donde $i = 1,2,3,4$ y $t = 1,2,3,4,5$. El problema es de maximización.

Inicialmente el problema PL asociado fue resuelto, obteniendo un valor objetivo de 159.13, pero, algunas de las variables enteras obtuvieron valores fraccionales. Este óptimo continuo del problema, por consiguiente, tiene que ser más restringido. Esto es conveniente para ver el proceso de solución subsecuente gráficamente como un árbol en el gráfico 12. Cada uno de los nodos del árbol representa un problema PL y son numerados secuencialmente en el orden en el cual los problemas son examinados. En cada nodo, el valor objetivo óptimo del correspondiente problema PL es dado. Para iniciar con el proceso, nosotros tenemos el problema original PL en el nodo 1. La optimización sigue los siguientes estados.

(a) La solución del correspondiente problema PL de una de las variables enteras (la cual ha obtenido un valor fraccional) es seleccionada (Esta variable es conocida como la variable de ramificación), en este caso nosotros seleccionamos la variable y_{25} la cual tuvo un valor de 0.87. Desde que y_{25} debe tener los valores 0 o 1 en cualquier solución entera, tenemos una de las dos siguientes posibilidades:

$$y_{25} = 0 \text{ o } y_{25} = 1.$$

(b) Ambas posibilidades son consideradas para crear dos nuevos subproblemas. Para el primer subproblema, representado por el nodo 2, añadimos la restricción $y_{25} \leq 0$ y para el segundo subproblema, añadimos $y_{25} \geq 1$. Los PLs correspondientes a estos subproblemas son resueltos. Ambos dan soluciones fraccionales con valores objetivos de 154.1 y 158.77 respectivamente. Como se esperaba, restringir el modelo PL original en cualquiera de las dos formas hace que el valor objetivo óptimo se deteriore.

Uno de los subproblemas resultantes es seleccionado para seguir con el desarrollo. Aquel que seleccionamos es, hasta cierto punto, arbitrario, aunque se pueden usar algunas heurísticas como se menciona abajo. Para este ejemplo seleccionamos el nodo 3 para seguir con el desarrollo y ejecutamos el procedimiento (a) otra vez. En este caso, la variable d_{25} es seleccionada para producir una ramificación de dos nuevos subproblemas en los nodos 4 y 5. Ambos problemas producen soluciones fraccionales cuando los resolvemos como PL. Desarrollando los nodos y minificándolos como se demuestra en el gráfico 12, eventual mente, produciremos un problema en el nodo 25, el cual está tan restringido que todas las variables enteras arrojan valores enteros.

Arbol Usado en el Método "Branch and Bound"

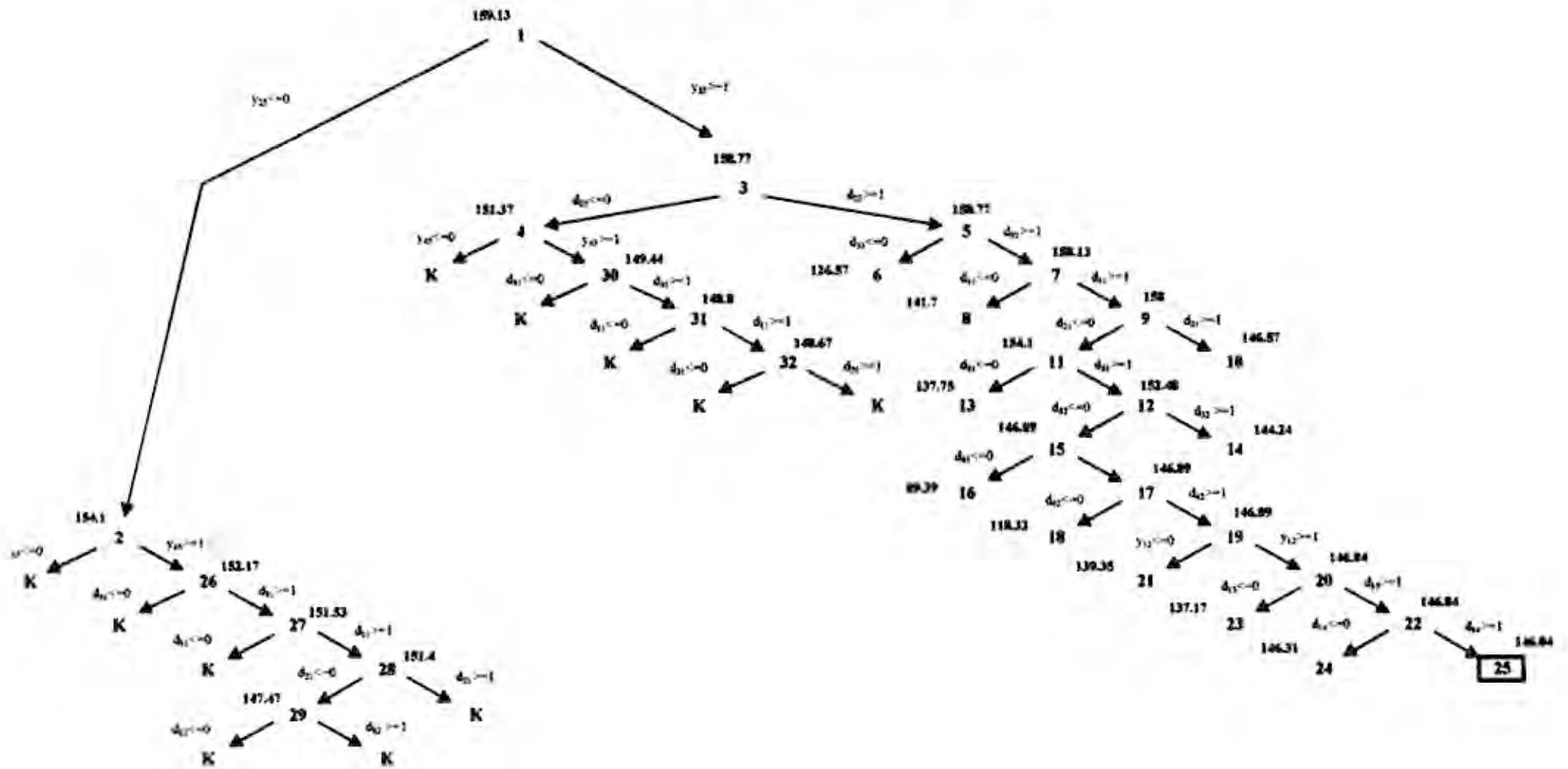


Gráfico 12

Es importante notar el deterioro sucesivo del valor objetivo óptimo a medida que añadimos más restricciones avanzando en el árbol.

(c) Habiendo alcanzado una solución entera (pero no necesariamente una óptima), en el nodo 25, guardamos la solución y analizamos su valor objetivo de 146.84. Esta es, claramente, la mejor solución entera conocida. Obviamente, no hay más variables dejadas para ramificarse en este nodo, de modo que podemos terminar la ramificación. Desde que el valor objetivo no puede mejorar a medida que bajamos en las ramas del árbol, podemos ignorar cualquier nodo donde el valor objetivo del problema PL sea peor (pequeño) que 146.8. Los nodos 6,8,10,13,14,16,18,21,23 y 24 no necesitan ser desarrollados y son ignorados.

(d) Ahora seleccionamos un nodo, el cual es aún un candidato para ser desarrollado (conocido como un nodo de espera). Los nodos 2 y 4 son los actuales nodos de espera. Seleccionando el nodo 2, seguimos la ramificación para la variable y^* . En el curso de la optimización, el problema en el cual la restricción $y^* = 0$ es considerado, la función objetivo se deteriora debajo de 146.84. Por eso, el PL asociado con este subproblema no es resuelto óptimamente y el nodo no es representado en el árbol del gráfico 12. Para representar este hecho estamos usando el símbolo K.

Procediendo de este modo a través de los nodos 26, 27, 28 y 29 todas las ramas son analizadas. El único nodo de espera remanente es el nodo 4, el cual es desarrollado en los nodos 30,31 y 32 hasta que todas las ramas sean analizadas. Desde que no hay más nodos de espera, la solución hallada en el nodo 25 es la óptima.

BIBLIOGRAFIA.

1. Brian Wilson«
Sistemas: Conceptos, metodologías y aplicaciones.
Editorial Limusa S.A. 1993 México, D.F.

2. James A. Seen«
Análisis y Diseño de Sistemas de Información. McGraw-
Hill, segunda edición, 1991 México, D.F.

3. Fernando Carbajal D' Angelo,
Compendio de Proyectos de Inversión.
Editorial San Marcos, 1990 Lima - Perú.

4. Eppen & Gould.
Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa.
Tercera Edición, 1992
Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., México

5. **H. P. Williams,**
Model Building in Mathematical Programing.
Third Edition, 1993 John Wiley & Sons West Sussex,
England

6. Hillier / Lieberman,

Introducción a la Investigación de Operaciones Me Graw
Hill, cuarta edición, 1990

7. **Juan Prawda,**

Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones.
Editorial Limusa, Primera edición 1981

8. **Hamy A. Taha,**

Investigación de Operaciones, una introducción. Sexta
Edición, 1998
Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., México

9. Roger G. Schroeder,

Administración de Operaciones.
Toma de Decisiones en la Función de Operaciones.
McGraw Hall« 1988

10. Kenneth E. Kendall, Julie E. Kendall

Análisis y Diseño de Sistemas
Tercera Edición, 1997
Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., México

11. James A. Seen

Sistemas de Información para la Administración Tercera
Edición, 1987
Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C. V., México