

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Programa Académico de Ingeniería Geológica**

**Minera y Metalúrgica**



**Una Aplicación de Programación Lineal  
en Minería a Cielo Abierto**

**T E S I S**

**Para Optar el Título de**

**INGENIERO DE MINAS**

**CESAR BERNAL MATALLANA**

**PROMOCION 1961**

**Lima - Perú**

**1979**

"El hombre es un incansable  
creador de sistemas"

Laurence J. Peter

Pero... "Sin un buen análisis de sistemas  
y diseño de sistemas como primer  
paso, o, al menos, como esfuerzo  
paralelo, no es fácil describir,  
comprender y especificar las  
partes de la solución".

Simón Ramo

UNA APLICACION DE PROGRAMACION LINEAL  
EN MINERIA A CIELO ABIERTO

<u>CAPITULO</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>Pág. N°</u>
	Lista de Cuadros	6
	Lista de Ilustraciones	7
	Lista de Funciones Objetivas, Restricciones y Variables.	8
I	<u>INTRODUCCION</u>	11
	1.1 Propósito y Alcance	12
	1.2 Organización del Estudio	13
II	<u>CONDICIONES GENERALES DE LA MINA</u>	15
	2.0 Generalidades	15
	2.1 Composición del Mineral	15
	2.2 Sistema de Explotación	16
	2.3 Perforación y Voladura	16
	2.4 Sistema de Carguío	17
	2.5 Ley de Mineral	17
	2.6 Control de Calidad	18
III	<u>PROGRAMACION LINEAL Y PLANEAMIENTO DE MINA</u>	20
	3.0 Generalidades	20
	3.1 Planeamiento de Mina	22
	3.2 Planeamiento Bajo Incertidumbre	27
	3.3 Revisión de la Literatura	28
IV	<u>FORMULACION DEL MODELO</u>	30
	4.0 Generalidades	30

<u>CAPITULO</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>Pág. Nº</u>
4.1	Objetivos a Corto Plazo	30
4.2	Nomenclatura del Modelo	34
4.3	Ecuaciones de Restricción	35
4.3.1	Capacidad de Producción	35
4.3.2	Capacidad de Carguío	36
4.3.3	Producción Mínima	37
4.3.4	Capacidad de Movimiento de Desmote.	37
4.3.5	Ley del Mineral	38
4.3.6	Asignación de la Producción	38
4.4	La Función Objetiva	39
4.4.1	Minimización del Costo de Transporte.	39
4.4.2	Maximización de la Secuencia de Explotación.	40
4.4.3	Minimización de la Combinación Costo de Transporte y Secuencia de Explotación.	40
V	<u>SOLUCION DEL MODELO DE PLANEAMIENTO DE MINA</u>	42
5.0	Solución Técnica	42
5.1	Sistema de Información	43
5.2	Unidades de Producción y Tiempo Efectivo de Trabajo.	43
5.3	Control de Calidad	44
5.4	Capacidad de Carguío y Demanda del Sistema.	44
5.5	Capacidad de Movimiento de Desmote.	46

<u>CAPITULO</u>	<u>CONTENIDO</u>	<u>Pág. N<sup>o</sup></u>
	5.6 Costo de Transporte y Coeficiente de Deseabilidad.	46
	5.7 Sistema de Codificación	49
	5.8 Análisis de los Resultados	49
	5.9 Programación de la Producción	52
	5.10 Comparación de los Resultados	57
 VI	 <u>ANALISIS POST-OPTIMO</u>	 65
	6.0 Generalidades	65
	6.1 Análisis Post-Optimo del Sistema de Programación Matemática "MPSX".	65
	6.2 Análisis de Sensibilidad	67
	6.3 Costos Marginales	69
	6.4 Rango de Variación de los Costos	72
	6.5 Rango de Variación de los Términos Independientes.	73
	6.6 Procedimientos de Programación Paramétrica.	74
 VII	 <u>SUMARIO</u>	 79
	7.0 Generalidades	79
	7.1 Conclusiones	80
	7.2 Recomendaciones	81
	 BIBLIOGRAFIA .....	 84
	 APENDICE A : - Modelo de Planeamiento de Producción de una Mina a Cielo Abierto	 86

APENDICE B	:	- Programa de Control MPSX, Listado de Entrada y Salida.....	89
APENDICE C	:	- Análisis Post-Optimo, Programa de Control, Listado de Entrada y Salida.....	100

ooooo 0 ooooo

LISTA DE CUADROS

<u>Nº</u> <u>DE CUADRO</u>	<u>TITULO</u>	<u>Pág. Nº</u>
1	Composición Química Promedio del Mineral.....	15
2	Rangos de la Ley del Mineral .....	45
3	Características de las Operaciones Unitarias .....	47
4	Coefficientes de Deseabilidad para Mineral y Desmonte .....	48
5	Resultados para Tres Diferentes Funciones Objetivas Demanda = 22,500Tons /Guardia .....	50
6	Programación de la Producción (Tons).	53
7	Utilización del Equipo de Carguío (Horas) .....	58
8	Interrelación de los Valores de las Tres Funciones Objetivas para los Tres Planes de Producción .....	63
9	Plan de Producción Mediante la Función Objetiva "MINCOST" .....	70
10	Análisis de Sensibilidad del Plan de Producción .....	71
11	Programación Paramétrica de los Términos Independientes, Asignación de Cuadrillas en el Sistema .....	76
12	Rangos del Costo Parametrizado de la Actividad Y13 .....	78

oooo 0 ooooo

LISTA DE ILUSTRACIONES

<u>Nº DE ILUSTRACION</u>	<u>TITULO</u>	<u>Pág. Nº</u>
1	Planeamiento de Mina y Aplicaciones de Programación Lineal.....	23
2	Flujo de Modelo .....	31
3	Plan de Producción de la Mina 1, Función Objetiva "MINCOST" .....	54
4	Plan de Producción de la Mina 2, Función Objetiva "MINCOST" .....	54
5	Plan de Producción de la Mina 1, Función Objetiva "MINSEQ" .....	55
6	Plan de Producción de la Mina 2, Función Objetiva "MINSEQ" .....	55
7	Plan de Producción de la Mina 1, Función Objetiva "COSTSEQ" .....	56
8	Plan de Producción de la Mina 2, Función Objetiva "COSTSEQ" .....	56
9	Planes de Producción de Mineral y Remoción de Desmonte Utilizando Diferentes Funciones Objetivas.	59
10	Costos Unitarios Promedios de Transporte Utilizando Diferentes Funciones Objetivas.....	62

ooooo 0 ooooo



## LISTA DE FUNCIONES OBJETIVAS, RESTRICCIONES Y VARIABLES

### FUNCIONES OBJETIVAS

COSTSEQ	:	Función Objetiva Minimización Costo de Transporte y Secuencia de Explotación.
MINCOST	:	Función Objetiva Minimización Costo de Transporte.
MINSEQ	:	Función Objetiva Maximización de la Deseabilidad de la Secuencia de Explotación.

### RESTRICCIONES

PRCASH11	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 1 de la mina 1
PRCASH12	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 2 de la mina 1
PRCASH13	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 3 de la mina 1
PRCASH14	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 4 de la mina 1
PRCASH15	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 5 de la mina 1
PRCASH16	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 6 de la mina 1
PRCASH17	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 7 de la mina 1
PRCAMIN1	:	Capacidad de Producción de la Mina 1
PRCASH21	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 1 de la mina 2
PRCASH22	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 2 de la mina 2
PRCASH23	:	Capacidad de Producción de la Unidad de Producción 3 de la mina 2
PRCAMIN2	:	Capacidad de Producción de la Mina 2
TOLOACAP	:	Capacidad total de carguío
DEMAND	:	Demanda
WASTMIN1	:	Relación de desmonte/mineral en Mina 1
WASTMIN2	:	Relación de desmonte/mineral en Mina 2
MINAL203	:	Cantidad mínima de AL203

MAXAL203 : Cantidad máxima de AL203  
MINLOSS : Cantidad mínima de pérdida de materias volátiles  
MAXILOSS : Cantidad máxima de pérdidas de materias volátiles  
MINNTFIN : Cantidad mínima de finos  
MAXNTFIN : Cantidad máxima de finos  
MAXPROM1 : Producción mínima Mina 1  
MAXPROM2 : Producción máxima Mina 2  
MINSIO2 : Cantidad mínima de SIO2  
MAXSIO2 : Cantidad máxima de SIO2

#### VARIABLES

X11 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 1 de la mina 1  
X12 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 2 de la mina 1  
X13 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 3 de la mina 1  
X14 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 4 de la mina 1  
X15 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 5 de la mina 1  
X16 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 6 de la mina 1  
X17 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 7 de la mina 1  
Y11 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 1 de la mina 1  
Y12 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 2 de la mina 1  
Y13 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 3 de la mina 1  
Y14 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 4 de la mina 1  
Y15 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 5 de la mina 1  
Y16 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 6 de la mina 1  
Y17 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 7 de la mina 1

X21 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 1 de la mina 2  
X22 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 2 de la mina 2  
X23 : Producción de Mineral de la Unidad de Producción 3 de la mina 2  
Y21 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 1 de la mina 2  
Y22 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 2 de la mina 2  
Y23 : Remoción de Desmonte de la Unidad de Producción 3 de la mina 2

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

En cualquier programa de control de calidad de productos mineralizados, dos consideraciones son fundamentales; la primera, cuando el mineral es empleado como materia prima para un determinado proceso de concentración que requiera un mineral de características bastante homogéneas, y la segunda, relacionada a los contratos de venta de minerales. La terminación de un contrato de venta puede producirse cuando ocurren variaciones durante un determinado período en la calidad del producto.

Con la finalidad de minimizar las variaciones de la ley del mineral, se utilizan áreas de almacenamiento de gran capacidad para el mezclado de mineral. El problema de control de la ley del mineral es bastante difícil cuando el mineral de diferentes áreas de producción es enviado a diversas áreas de procesamiento. Además de la composición del mineral es necesario considerar otros factores cuando se planifica el programa de producción de la mina. Los costos de transporte, la secuencia de explotación, el movimiento de desmonte, etc., se encuentran entre dichos factores. La técnica de Programación Lineal (\*) puede ser aplicada para optimizar el problema de planeamiento de la producción. Usando esta técnica los problemas sobre la ley del mineral, la secuencia de explotación, así como otros, pueden ser optimizados si

(\*) Representada por P.L. en el resto del estudio.

multáneamente.

### 1.1 Propósito y Alcance

Sin considerar la situación de oferta y demanda existente entre la Mina y la Planta, la responsabilidad de la producción de un mineral de una ley relativamente uniforme es función del Ingeniero de Minas. El éxito de un programa de control de calidad en particular, así como el buen resultado económico de la operación minera en general es función del planificador minero, el cual define el plan de producción con el fin de obtener los siguientes beneficios:

- a. Realización del plan de producción a corto plazo.
- b. Cumplir con los planes diarios de producción con el fin de alcanzar los tonelajes y leyes requeridos.
- c. Programar las áreas de explotación para operaciones mineras futuras.
- d. Alcanzar los objetivos a, b y c del modo más eficiente.

Con este fin se ha desarrollado un modelo de P.L. para el planeamiento de mina, tomando en consideración las condiciones que restringen dichas operaciones. Los procedimientos de P.L. con que se cuentan en el Sistema de Programación Matemática MPSX (\*) serán empleados para obtener la solución del modelo. Las restricciones de la explotación fueron evaluadas para tres funciones objetivas: (1) Minimizar los costos de transporte, (2) Maximizar la deseabilidad de una secuencia de explotación y (3) Minimizar la relación de (1)

(\*) "Mathematical Programming System", que en adelante se denominará abreviadamente "MPSX".

y (2).

Estas funciones objetivas posteriormente están referidas como "MINCOST", "MINSEQ" y "COSTSEQ" respectivamente (las soluciones encontradas son analizadas en relación al plan de producción).

Posteriormente empleando procedimientos paramétricos del MPSX, se han realizado análisis post-óptimos de las soluciones encontradas, considerando variaciones en la disponibilidad de los recursos, capacidad de producción y costo de transporte.

Las ventajas del modelo son las siguientes:

- a. Ayudará a la programación de la producción.
- b. Identificará áreas con problemas potenciales.
- c. Permitirá analizar los efectos de las diferentes decisiones que puedan ser tomadas y analizar el efecto de las mismas en la producción antes de ser implementadas.

## 1.2 Organización del Estudio

El presente estudio está organizado en siete capítulos incluyendo la presente Introducción. En el Capítulo II se presenta las condiciones generales de la mina, materia del presente estudio. Los conceptos de planeamiento de mina así como las técnicas y aplicación de P.L. son brevemente analizadas en el Capítulo III. En el Capítulo IV se formula un modelo de P.L., así como también se definen las ecuaciones de restricción en detalle, junto con el análisis de la fun-

ción objetiva. La aplicación, solución y análisis del modelo con la información que se ha asumido se muestran en el Capítulo V. En el Capítulo VI se analizan las soluciones encontradas mediante análisis post-óptimos usando procedimientos de programación paramétrica. Las recomendaciones y conclusiones del modelo, así como un enfoque para estudios futuros se analizan en el Capítulo VII. Finalmente, el Apéndice A presenta un modelo de planeamiento de producción de una mina a cielo abierto, mientras que los Apéndices B y C muestran el programa de control para el MPSX y los listados de entrada (INPUT) y salida (OUTPUT) respectivamente.

## CAPITULO II

### CONDICIONES GENERALES DE LA MINA

#### 2.0 Generalidades

Teniendo en consideración el carácter del presente estudio, y por otro lado no contando el autor con información consistente y suficiente de una mina nacional, a fin de asumir ciertas condiciones de operación, se ha tomado información de una mina extranjera (ORINOCO MINING COMPANY , de Venezuela) para poder realizar los cálculos correspondientes usando el "MPSX" con el objeto de resolver el modelo de Programación Lineal que se propone.

#### 2.1 Composición del Mineral

El mineral que se considera en el presente estudio ha sido clasificado en dos clases, teniendo cada uno de ellos diferentes características físicas y químicas. Los "gruesos" que estan constituidos por mineral duro y poroso y los "finos" formado por hematita y agregados de limonita. El análisis químico promedio del mineral presenta la siguiente composición:

#### CUADRO Nº 1

##### Composición Química Promedio del Mineral

Fe	63.71 %
P	0.07 %



Mn	0.03 %
SiO <sub>2</sub>	1.25 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.35 %
TiO <sub>2</sub>	0.08 %
MgO	0.22 %
CaO	0.28 %
S	0.03 %
Materias Volátiles (MV)	5.98 %

## 2.2 Sistema de Explotación

La explotación se realiza por el sistema de tajo abierto. Se perforan taladros de 12 pulgadas, usando perforadoras eléctricas. Como explosivo se usa el ANFO y el mineral es cargado mediante palas eléctricas de 10 yardas cúbicas. El transporte de mineral se realiza empleando camiones de 100 toneladas cortas, los cuales llevan dicho material hacia áreas de almacenamiento, de donde es cargado a carros de ferrocarril.

## 2.3 Perforación y Voladura

Se emplean perforadoras eléctricas Bucyrus-Erie 61-R, las cuales pueden perforar taladros verticales o inclinados de 12 1/4". La velocidad de penetración depende del tipo de material y la inclinación del taladro.

El ANFO es el agente standard de voladura. Se ha demostrado en forma fehaciente su performance en este tipo de material. Por otro lado, es más económico cuando se usa tala -

dros de mayor diámetro, tales como los que se emplean en esta operación.

La perforación y voladura secundaria es también práctica común en las operaciones mineras diarias. La voladura empleando taladros de diámetro menor (4 1/2"), así como el "plasteado", es frecuentemente empleado para romper bancos dejados por la perforación primaria o cuando el transporte a ciertas áreas es difícil con el equipo estándar.

#### 2.4 Sistema de Carguío

El equipo de carguío está constituido principalmente por palas eléctricas Bucyrus Erie, 190-B de 10 yardas cúbicas (Cu-yd). La velocidad de carguío varía de acuerdo al tipo de material. Esta velocidad puede variar de 4,000 toneladas en cuarcita a 8,000 toneladas o más por guardia en material suave. También se emplean Cargadores Frontales de 8 yardas cúbicas, como equipo de carguío con el fin de alcanzar los estimados de producción.

Para el acarreo de mineral y desmonte, se emplean camiones Lectra-Haul de 100 toneladas. Se utiliza el sistema camión-tren el cual alcanza gran flexibilidad en los frentes de trabajo. A fin de alcanzar el máximo rendimiento de las unidades, es muy importante que la carretera se mantenga en buenas condiciones.

#### 2.5 Ley del Mineral

El control de la ley de mineral comienza por el análisis de

planos geológicos de los niveles con relación a áreas trabajadas previamente. Esto agregado a la información de los tallados originales de exploración, permite una información básica para los planes futuros de planeamiento. Una vez que el área ha sido perforada, los análisis de las muestras proporcionan información adicional de las leyes. Durante el ciclo de producción, a fin de obtener información más realista para el control de la ley en las áreas de almacenamiento, se precisa de un adecuado muestreo en los frentes de trabajo y en los carros de mineral.

Las áreas de descarga del desmonte están localizadas fuera de los límites futuros del tajo o en algunos casos en áreas abandonadas.

## 2.6 Control de Calidad

La relación de precio y calidad, la cual es conocida como la "relación precio-calidad" establece si un determinado mineral es o no competitivo en un mercado particular. Para los productos de fierro y acero, el mineral de hierro tiene un componente principal que es su contenido metálico y una impureza principal (el contenido en fósforo el cual afecta el precio). Los otros componentes químicos del mineral tienen cierta significación debido a su gran variación y a su influencia en el proceso metalúrgico de reducción para producir acero.

El contenido de fósforo en el mineral de fierro es menor que

0.1%, tal como se indica en el Cuadro 1 y es considerado significante. Por lo tanto las impurezas que son controladas en estas dos minas son: Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y Materias Volátiles (MV). El contenido de fierro también es controlado, pero no tan rigurosamente como las impurezas que se mencionan anteriormente. Sin embargo, muchos de los mercados europeos deben ser abastecidos con una cierta proporción de "finos naturales", por lo que es necesario un riguroso control de los "finos".

## CAPITULO III

### PROGRAMACION LINEAL Y PLANEAMIENTO DE MINA

#### 3.0 Generalidades

La programación lineal es una técnica matemática que trata sobre problemas de distribución de recursos entre actividades competitivas de una manera óptima.

Los problemas de P.L. tienen la siguiente estructura general:

- a. Una función objetiva que tiene que ser satisfecha. Esta puede ser maximizar las ganancias, minimizar el costo, etc.
- b. Se debe considerar un gran número de variables, las que pueden representar toneladas de mineral, leyes, compósitos, máquinas-horas, disponibilidad de frentes de trabajo, capacidad máxima del equipo y/o planta, etc.
- c. Un número de interacciones existe entre las variables, por ejemplo, tratando de determinar las toneladas que deben ser extraídas de una determinada unidad de producción, cuando hay un número determinado de unidades de producción, de tal modo que se maximice o minimize la función objetiva.
- d. La mayoría de los problemas de P.L. están caracterizados por un conflicto con la función objetiva. Por ejemplo puede surgir un problema, cuando una cantidad míni-

ma de toneladas debe ser extraída de una unidad de producción, sin tener en consideración su efecto en la función objetiva.

La P.L. usa modelos matemáticos para describir los problemas que se están analizando. El adjetivo "lineal" significa que todas las funciones matemáticas usadas en los modelos deben ser funciones lineales. "Programación" es un sinónimo de planeamiento y solución, es por ello que la P. L. es esencialmente empleada en planeamiento de actividades de funciones lineales, con el fin de obtener un resultado óptimo entre todas las alternativas posibles o en el análisis de sistemas complejos.

La solución manual de pequeños problemas de P.L. es tediosa y demanda mucho tiempo, lo que se requiere es sólo un conocimiento de las operaciones matemáticas básicas. Sin embargo, un conocimiento de los fundamentos de P.L. requiere conocimientos de matemáticas avanzadas.

El problema general de P.L. puede ser definido como sigue:

Maximizar (o minimizar)

$$Z = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n,$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \dots + a_{1n} X_n (<, =, \text{ ó } >) b_1,$$

$$a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + \dots + a_{2n} X_n (<, =, \text{ ó } >) b_2,$$

$$a_{m1} X_1 + a_{m2} X_2 + \dots + a_{mn} X_n (<, =, \text{ ó } >) b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

donde  $C_j$ ,  $b_i$ ,  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) y ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) son constantes conocidas, las cuales son determinadas por la estructura del problema;  $x_j$  son las variables de decisión y que no son conocidas. Se nota que por cada restricción sólo uno de los signos se mantiene ( $<$ ,  $=$ ,  $>$ ).

La formulación que se ha descrito puede ser simplificada usando el signo de sumatoria,

$$\text{Maximizar (o minimizar)} \quad Z = \sum_{j=1}^n C_j x_j$$

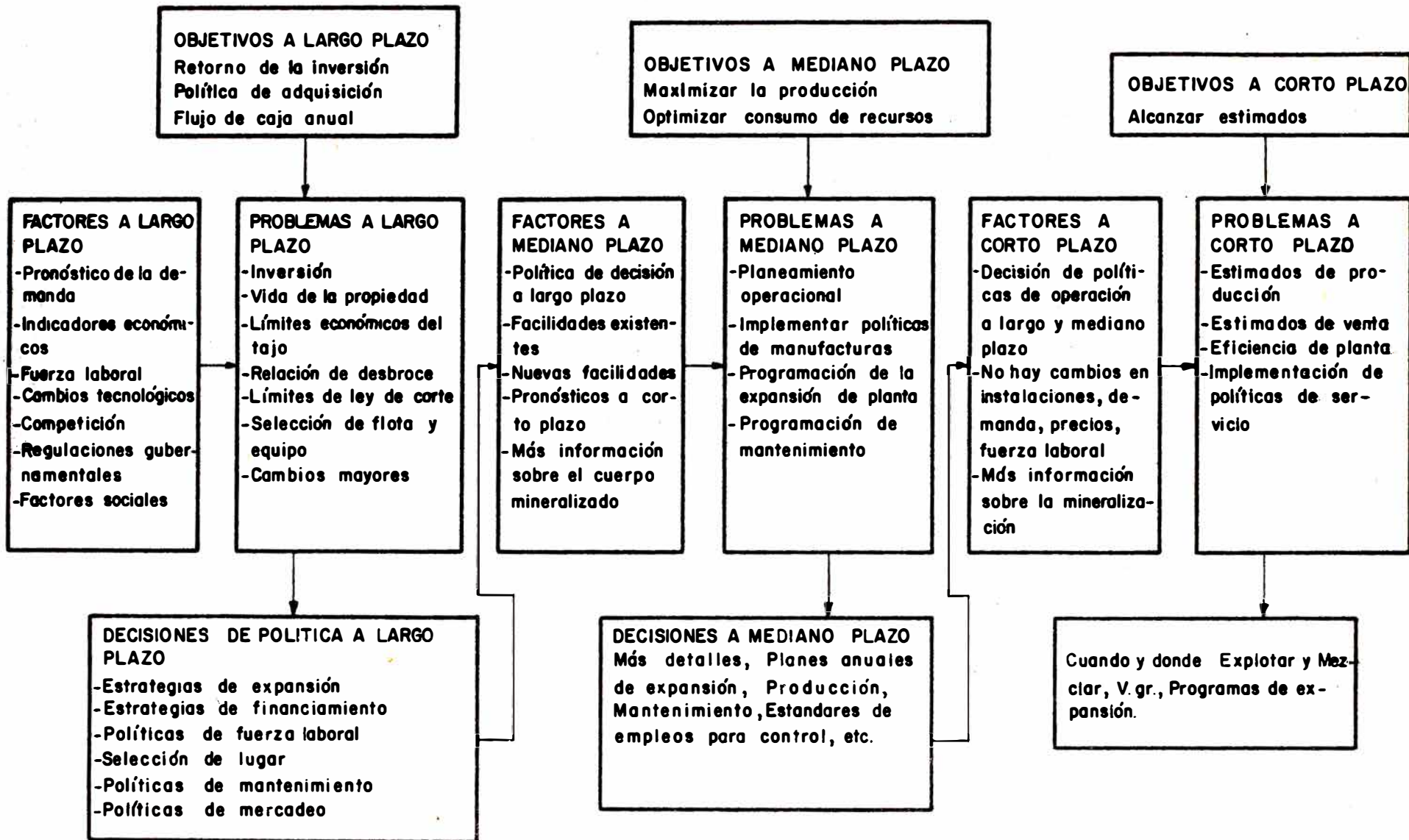
Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (<, =, >) b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$x_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

### 3.1 Planeamiento de Mina

Uno de los objetivos de planeamiento de mina es determinar el mejor plan de explotación sujeto a restricciones impuestas por condiciones ya sean físicas y/o geológicas y de política de la Empresa. El planeamiento de mina puede ser dividido en: planeamiento a largo plazo, corto plazo y operacional. Los diferentes aspectos de estos planes han sido delineados para una mina a cielo abierto en la ilustración



Usos de Programación Lineal:

- Simulación y Evaluación de Alternativas

- Asignación de Producción a las Instalaciones Dentro de cada periodo de tiempo.

- Secuencia de Producción  
- Controles de las Unidades de Producción



El plan a largo plazo: tiene que ver principalmente con el planeamiento de las instalaciones y facilidades futuras, y define elementos tales como el límite económico del tajo, forma y tamaño del mismo, relación de desbroce, facilidades futuras, etc. Se le usa también como guía para planes a corto plazo.

El plan a corto plazo: está estructurado sobre la base semanal o mensual. Generalmente está ligado con operaciones o planes que usan equipos y recursos existentes con la finalidad de alcanzar los objetivos fijados por los planes a largo plazo.

El plan operacional: tiene que ver con las condiciones operativas actuales dentro del plan a corto plazo más reciente. Dicho plan de producción debe ser consistente con los planes operativos a corto plazo y al mismo tiempo debe alcanzar los objetivos actuales. Esto involucra la asignación de hombres y equipos a las diferentes operaciones mineras limitadas por las condiciones y políticas presentes. El período de planeamiento es generalmente de un mes, con etapas semanales, diarias o por guardias.

La Programación Lineal es empleada más frecuentemente en planeamiento a corto y mediano plazo, ya que trabaja sobre la base de coeficientes o parámetros promedio. La incertidumbre existente en estos intervalos es relativamente pequeña y puede ser ignorada. Sin embargo, la P.L. tiene grandes

aplicaciones en el planeamiento a largo plazo, siendo uno de ellas la incorporación de nuevas facilidades en los modelos existentes a corto y mediano plazo. Frecuentemente es empleada para establecer tendencias de precios futuros de las materias primas y productos terminados y determinar estrategias óptimas futuras bajo una situación ambiente simulada.

El proyecto de planeamiento óptimo es la selección de un orden definido de trabajo que es provechoso según los objetivos de la Empresa. La formulación exacta de los objetivos a nivel Empresa es por lo tanto una pre-condición del planeamiento óptimo. Por ejemplo:

- maximización de la rentabilidad.
- maximización de la eficiencia de la Empresa.
- maximización de la producción y/o los ingresos.
- minimización de los costos de producción.

Sólo es posible alcanzar cada uno de los objetivos mencionados cuando se observa al mismo tiempo ciertas condiciones definidas o restricciones. Otros requerimientos para el planeamiento óptimo además de los objetivos son las variables de decisión, la información y la duración del período de planeamiento.

Tanto en el planeamiento como en la administración de una mina, los ingenieros se enfrentan con problemas técnicos y también de organización. Los problemas técnicos conciernen al diseño y el rendimiento del equipo requerido así como las

técnicas empleadas para llevar a cabo las operaciones mineras. Muchos de los aspectos técnicos de la minería pueden ser objeto de análisis y actualmente reciben atención debido a que están siendo desarrollados nuevos equipos y técnicas.

Los problemas organizacionales conciernen la utilización de estas facilidades tales como la selección de equipo, planeamiento del diseño de mina y la secuencia de operaciones. Estos problemas son de tal magnitud y complejidad que determinan que la aplicación de P.L. sólo sea posible en un limitado número de minas.

El limitado uso de la computadora en minería subterránea como una herramienta operativa de decisión se debe en parte a un justificado recelo por parte de los operadores de mina sobre la exactitud de los resultados de la Computadora. Muchas veces esto se debe a fallas de programación o bien a fallas de la información suministrada a la computadora. Actualmente CENTROMIN PERU está implementando un Modelo Matemático para Planificación de Operaciones Mineras, en la Unidad de Producción de Casapalca, como parte del programa de Investigación Operativa en Minería. Basado en él se desarrollarán modelos específicos para cada una de las otras minas de la Empresa. Con dicho modelo se añade una nueva etapa a la planificación de la producción de la Empresa, continuándose de esta forma con la modelación de las principales actividades productivas de la Compañía iniciada con el Mode

lo Matemático de Zinc en 1971.

El presente estudio concierne con la aplicación de P.L. a la producción de un complejo de dos minas a cielo abierto. El propósito es optimizar una función objetiva (costo de minado, secuencia de explotación o una combinación de ambos), sujeto a restricciones y políticas dentro de un plan a corto plazo.

### 3.2 Planeamiento bajo incertidumbre

Contrario al planeamiento operacional y a corto plazo, el planeamiento a largo plazo generalmente está asociado con decisiones que involucran un alto grado de incertidumbre. Cuando mayor es el período sobre el cual el proceso de planeamiento se aplica, más importante es el aspecto de la incertidumbre o riesgo. Como se planteó anteriormente, inherente en la solución de muchos problemas de P.L. es el supuesto de que los parámetros involucrados son determinísticos en naturaleza. Sin embargo, los procedimientos de solución de P.L. tienen medios para estudiar la sensibilidad de la solución respecto a las variaciones de los parámetros del problema. Adicionalmente, el cambio de la función objetiva con variaciones en los coeficientes del problema y la solución al nuevo problema, puede también ser derivado de algunos de estos procedimientos. Pero, los procedimientos de solución de P.L. no tienen la capacidad para analizar variaciones probabilísticas o no-lineales. En muchas situaciones las decisiones de producción deben ser hechas frente a

una demanda variable, fluctuaciones de los costos y/o contri  
bución, variaciones estocásticas de los coeficientes de uso  
de la matriz del modelo, etc.

En casos de problemas estocásticos se aplican otros procedi  
mientos de solución, tales como la Programación en dos eta  
pas bajo incertidumbre, Programación Lineal Estocástica, etc.

### 3.3 Revisión de la Literatura

Al igual que el contínuo uso de computadoras en la indus -  
tria minera, ha tomado gran importancia el uso de la inves -  
tigación de operaciones para resolver problemas de explota -  
ción y concentración. La P.L., específicamente, ha evocado  
considerable interés debido a su uso potencial en el control  
de calidad y programación de la producción. Las aplicacio -  
nes de P.L. publicadas entre otras, comprenden estudios de  
planeamiento operacional, planeamiento a corto plazo, pla -  
neamiento a largo plazo y determinación del límite final de  
tajo abierto. A continuación se presenta un resumen de traja  
bajos desarrollados en el área de la programación matemáti -  
ca aplicada a la industria minera.

Manula (1965) aplicó las técnicas de P.L. a problemas de progra  
mación de producción de una mina subterránea de carbón  
en el Este de Estados Unidos.

Kim (1967) desarrolló un modelo de planeamiento a corto plaja  
zo para una operación minera de una mina de cobre a cielo  
abierto. Dicho autor determinó secuencias y niveles de ex -

plotación para un intervalo de planeamiento mensual.

Ramani (1970) formuló y aplicó un modelo de P.L. para resolver una operación de una planta múltiple de piedra chancada, la solución que obtiene define planes de producción y planes de embarque de piedra chancada de la planta a los mercados de consumo.

Janssen (1969) aplicó la técnica de P.L. en planeamiento de producción a largo plazo. Los planes fueron de explotación optimizados o sujetos a restricciones de demanda, capacidad de la mina, mezclado del mineral y ley del mineral.

Albach (1967) propuso un modelo de P.L. para determinar el desarrollo óptimo de períodos múltiples de producción en un determinado horizonte de planeamiento. El desarrollo se refiere a la remoción de estéril (o desmonte) con el fin de exponer el depósito mineralizado (carbón).

Johnson (1968) formuló un modelo de P.L. para el planeamiento de una mina a cielo abierto utilizando el concepto de bloque. La solución fue desarrollada a través de la descomposición y división del problema en sub-problemas elementales de ganancias o beneficios, para lo cual desarrolló un algoritmo. El sistema de explotación-concentración-refinación fue optimizado sobre un horizonte integral de planeamiento, permitiendo al sistema determinar cuándo y cómo procesar un bloque de material mineralizado, es decir, un "cutoff" dinámico.

## CAPITULO IV

### FORMULACION DEL MODELO

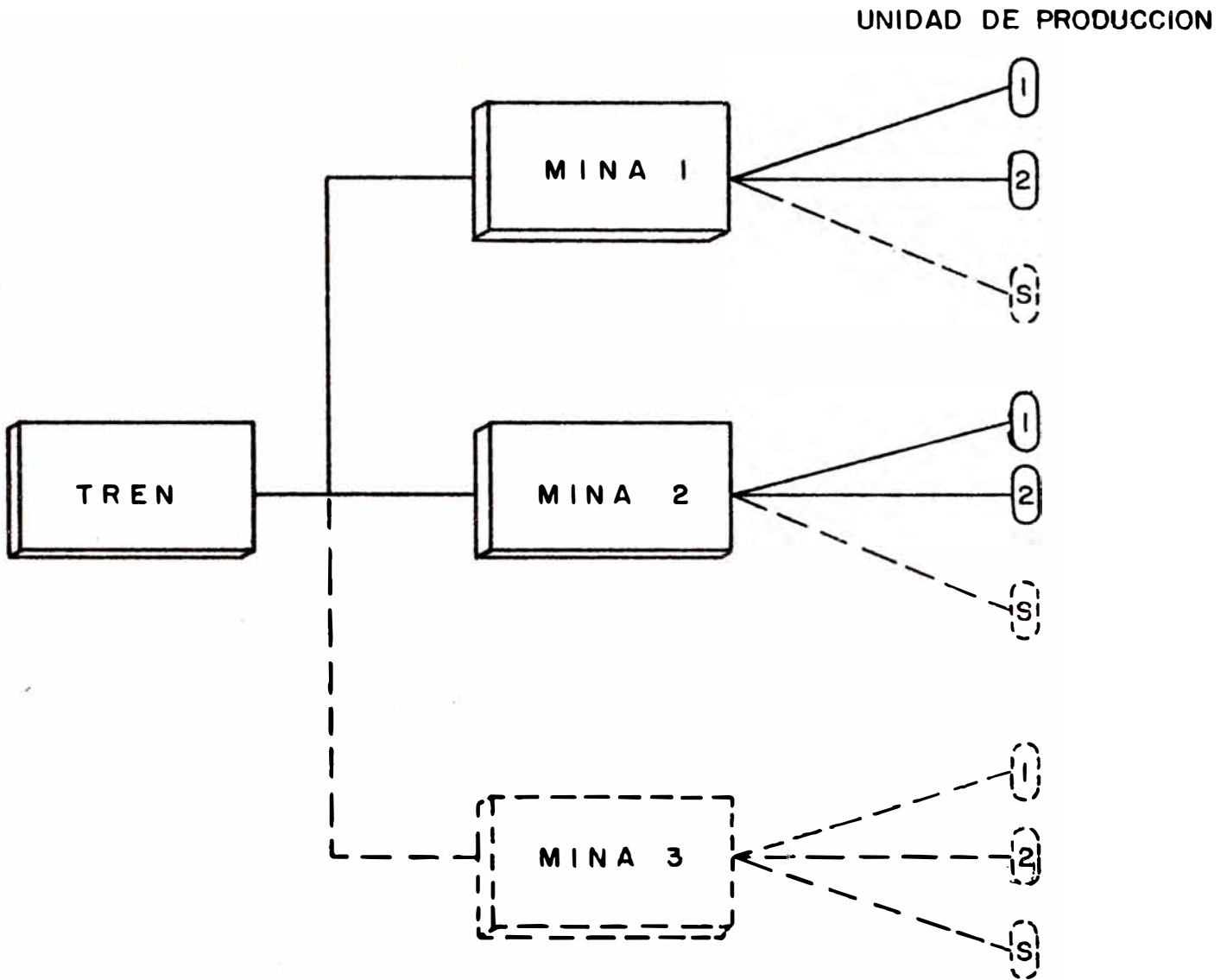
#### 4.0 Generalidades

El sistema considerado en este estudio involucra las operaciones de explotación existentes en cualquier mina a cielo abierto. Generalmente las operaciones consisten en: perforación, disparo, carguío y transporte del material de los diferentes frentes de explotación de la mina al área de descarga de los camiones. De la mina el mineral es llevado a las áreas de chancado, de donde es almacenado o enviado a las plantas de procesamiento metalúrgico. El movimiento de grandes cantidades de desmonte se encuentra asociado a la operación.

El presente sistema se muestra en la Ilustración 2 con relación al flujo del modelo. En resumen este modelo ha sido desarrollado con la finalidad de programar la producción de una operación minera múltiple. Las restricciones incluyen el tiempo disponible de producción para cada unidad de producción en cada mina, la relación de mineral a desmonte en las minas, la ley del mineral en cada mina y la calidad del producto final. La producción total está determinada por la demanda y la capacidad total del sistema de carguío.

#### 4.1 Objetivos a Corto Plazo

El horizonte de planeamiento del modelo está definido sobre



ILUSTRACION Nº 2 FLUJO DEL MODELO



la base de una guardia. Este pequeño horizonte de planeamiento implica restricciones operacionales tales como poca flexibilidad en variar los recursos originales (tales como la capacidad del equipo y el total de fuerza laboral) y los coeficientes técnicos (tales como la capacidad de producción y los costos de transporte o acarreo).

Los objetivos principales a considerarse en el planeamiento a corto plazo se podrán resumir de la siguiente forma:

- a. Realización de los objetivos de producción y ley del mineral.
- b. Mantener la secuencia de explotación sugerida por el plan a largo plazo.
- c. Explotar y transportar mineral y desmonte al menor costo.
- d. Mantener la relación de desbroce (mineral/desmonte).

La P.L. no puede resolver problemas que involucren objetivos múltiples. La dificultad radica en la unidimensionalidad de la función objetiva, por lo cual se optimiza sólo uno de los objetivos que se busca alcanzar, los otros objetivos son expresados mediante ecuaciones de restricción.

Sin embargo, el planificador minero puede plantear varios programas de producción, los cuales optimizan una función determinada. Por ejemplo, el presente modelo es planteado con tres funciones objetivas, cada una sujeta al mismo conjunto de restricciones o requerimientos. Los objetivos son: (1) Minimización de los costos de transporte del frente de

explotación a las áreas de descarga del mineral y desmonte (MINCOST), (2) Maximización de la secuencia de explotación (MINSEQ) y (3) Minimización de los objetivos (1) y (2) respectivamente (COSTSEQ).

La función objetiva minimización de los costos "MINCOST" se explica por si sola. En cambio, el concepto de maximización de la secuencia de explotación requiere cierta elaboración. Los coeficientes de la función objetiva "MINSEQ" considerados como "Coeficientes de deseabilidad" son número finitos asignados a los frentes de trabajo. Los valores para estos coeficientes varían de 0.00 a 0.03, con incrementos de 0.01, dependiendo dicho valor en la explotación futura de un determinado frente. Cuando menor sea dicho valor, menor será la necesidad (o deseabilidad) que dicho frente sea explotado a corto plazo.

Los coeficientes de la función objetiva "COSTSEQ" son obtenidos escalando los coeficientes de deseabilidad para un determinado frente de trabajo con relación al costo de transporte a dicho frente. Desde que este escalamiento es un factor de juicio en el presente estudio, los coeficientes son obtenidos sustrayendo los coeficientes "MINSEQ" de los correspondientes coeficientes "MINCOST". Considerando que a corto plazo, la disponibilidad de los recursos es conocida con certidumbre, el planificador puede utilizar cualquiera de las funciones objetivas mencionadas anteriormente para optimizar. Por ejemplo, si hay una restricción en el

costo de transporté de mineral en un determinado día, la función objetiva "MINSEQ" puede ser considerada en lugar de las funciones "MINCOST" y "COSTSEQ".

Las condiciones de no-negatividad y no-entera en la formulación de un modelo de P.L., están satisfechas definiendo las variables de decisión en toneladas de mineral, las cuales deben ser no-negativas y pueden ser no-enteras.

#### 4.2 Nomenclatura del Modelo

Los símbolos y nomenclatura usadas en este modelo están definidos a continuación:

- m - número de minas.
- s - número de unidades de producción de la mina  $i^{\text{th}}$ .
- e - número de elementos y/o compuestos en el mineral.
- i - Sub-índice que denota una mina ( $i = 1, \dots, m$ )
- j - Sub-índice que denota unidad de producción ( $j = 1, \dots, s$ )
- k - Sub-índice que denota un compuesto o elemento ( $k = 1, \dots, e$ )
- $X_{ij}$  - Producción de mineral por guardia en la unidad de producción  $j^{\text{th}}$  de la mina  $i^{\text{th}}$
- $Y_{ij}$  - Toneladas de desmonte a remover por guardia en la unidad de producción  $j^{\text{th}}$  de la mina  $i^{\text{th}}$

- $a_{ijk}$  - Porcentaje del elemento o compuesto  $k^{th}$  en el mineral de la unidad de producción  $j^{th}$  de la mina  $i^{th}$
- $m_k, l_k$  - Porcentajes máximo y mínimo respectivamente del elemento o compuesto  $k^{th}$  en el producto final.
- LC - Capacidad total de carguío del sistema.
- $or_{ij}, wr_{ij}$  - Capacidad promedio de movimiento de mineral y desmonte en el frente de trabajo (hora/ton) respectivamente de la unidad de producción,  $j^{th}$  en la mina  $i^{th}$
- $SA_{ij}$  - Tiempo disponible de trabajo por guardia para la unidad de producción  $j^{th}$  de la mina  $i^{th}$
- $TA_{ij}$  - Tiempo total disponible de producción por guardia para la unidad de producción  $j^{th}$  de la mina  $i^{th}$
- $u_i, v_i$  - Producción máxima y mínima respectivamente para la mina  $i^{th}$
- $r_i$  - Relación de desbroce (mineral/desmonte) para la mina  $i^{th}$
- Q - Demanda total del sistema.

### 4.3 Ecuaciones de Restricción

Las restricciones en el sistema de explotación determinan las ecuaciones de restricción del modelo.

#### 4.3.1 Capacidad de Producción: Este conjunto de ecuaciones

está determinado por el tiempo promedio de trabajo en horas disponibles en cada unidad de producción durante la guardia que se considera.

$$or_{ij}X_{ij} + wr_{ij}Y_{ij} \leq SA_{ij} \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, s) \quad (1)$$

El número disponible de horas-grupo de trabajo para cada mina también restringe la capacidad de producción del sistema.

$$\sum_{j=1}^s or_{ij}X_{ij} + \sum_{j=1}^s wr_{ij}Y_{ij} = TA_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

Se debe notar que el signo igual (=) se mantiene en la ecuación (2) con la finalidad de una utilización total de la fuerza laboral y de los equipos disponibles durante la guardia.

**4.3.2 Capacidad de Carguío:** Se asume como política de la Empresa que no debe existir áreas de almacenamiento en las minas. La razón principal de esta política es la de evitar el doble acarreo de materiales y el consiguiente incremento de los costos de transporte. Es por ello que la capacidad total de carguío del sistema está fijada por el número de carros vacíos dejados en las minas al final de la guardia anterior más el número de carros vacíos que llegan con los convoyes que se programan durante la guardia.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s X_{ij} \leq LC \quad (3)$$

4.3.3 Producción Mínima: Se requiere que el nivel de producción alcance por lo menos la demanda establecida. Sin embargo, el nivel de producción puede ser mayor que la demanda, pero debe ser menor que la capacidad de carguío.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s x_{ij} \geq Q \quad (4)$$

4.3.4 Capacidad de Movimiento de Desmante: Todas las operaciones de explotación tienen que ver de un modo u otro con el movimiento de desmante. La relación total de desbroce está determinada por el límite final del tajo y el planeamiento a largo plazo. Sin embargo, la cantidad de mineral y desmante removido diariamente es función del plan a corto plazo. Algunos valores intermedios son estimados para poder alcanzar el límite final del tajo, considerando restricciones físicas y operativas. La relación de mineral y desmante a corto plazo deberá ser mantenido con la finalidad de evitar demoras en el desarrollo de nuevas áreas de producción y eventualmente una disminución en la flexibilidad de las operaciones.

$$\sum_{j=1}^s (x_{ij}/Y_{ij}) \leq r_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5)$$

Esta restricción ha sido mantenida intencionalmente menor o igual ( $\leq$ ) con la finalidad de asegurar el mo

vimiento de desmonte cuando se encuentre atrasada con relación a lo programado. Esto permitirá que la mina utilice completamente el equipo para el movimiento de desmonte cuando la demanda es baja.

4.3.5 Ley del Mineral: La calidad del mineral producido es también de importancia primaria en este tipo de operación. Las restricciones en la composición del mineral están expresadas por  $m_k$  y  $l_k$ , las cuales representan los porcentajes máximo y mínimo tolerables respectivamente del elemento y/o compuesto  $k^{\text{th}}$  en el mineral. Estas restricciones de calidad, en este caso específico, deben ser satisfechas para cuatro componentes a saber: sílice, alumina, materias volátiles, y finos, tal como fueron descrito en el Capítulo II.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s (a_{ijk} - l_k) x_{ij} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, e) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s (m_k - a_{ijk}) x_{ij} \geq 0 \quad (k = 1, \dots, e) \quad (7)$$

4.3.6 Asignación de la Producción: La asignación de la producción entre las dos minas consideradas en el modelo encaja en el planeamiento a largo plazo. Esta restricción permite a la mina evitar mayores cambios en la utilización del personal y equipo en ambas minas y permite un equilibrio de las dos operaciones.

$$\sum_{j=1}^s (x_{ij}/x_{2j}) \leq u_i \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^s (x_{ij}/x_{2j}) \geq v_i \quad (9)$$

Se puede notar que restringiendo la producción en una mina dentro de un determinado rango, se restringe automáticamente el nivel de producción de la otra.

#### 4.4 La Función Objetiva

Las tres funciones objetivas analizadas anteriormente se presentan a continuación:

4.4.1 Minimización del Costo de Transporte: El problema mas simple es aquel que minimiza el costo total de transporte. Aquí se definen dos sistemas de costos:  $\{co_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$  y  $\{cw_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$  donde  $co_{ij}$  y  $cw_{ij}$  son los costos de transporte de una tonelada de mineral y desmonte respectivamente, de la unidad de producción  $j^{th}$  en la mina  $i^{th}$ . El problema de optimización entonces puede ser planteado como sigue: Sujeto a las restricciones de (1) a (9), encontrar los valores para  $\{x_{ij}\}$  y  $\{y_{ij}\}$  que minimice  $Z$ , (costo total de transporte), donde:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s co_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s cw_{ij} y_{ij} \quad (10)$$



4.4.2 Maximización de la Secuencia de Explotación: El problema de secuencia de explotación puede ser planteado de dos maneras. Primero, puede ser controlado directamente considerando restricciones en la producción máxima y mínima en cada unidad de producción. Segundo, se puede establecer el rango en la forma más amplia posible a fin de permitir cierta flexibilidad en la obtención de cuotas de producción. En este último caso, se debe asignar a cada unidad de producción un "coeficiente de deseabilidad". Este coeficiente debe ser escalado de tal modo que refleje la "deseabilidad" de explotar un determinado bloque de mineral con relación a otros. Definiendo " $do_{ij}$ " y " $dw_{ij}$ " como los coeficientes de deseabilidad para mineral y desmonte respectivamente de la mina  $i^{th}$ , unidad de producción  $j^{th}$ , por ejemplo:

$$\{do_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$$

$$\{dw_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$$

El problema de optimización se reduce a encontrar valores para  $\{X_{ij}\}$  y  $\{Y_{ij}\}$  sujetos a las restricciones de (1) á (9), los cuales maximizan Z, donde:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s do_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s dw_{ij} Y_{ij} \quad (11)$$

4.4.3 Minimización de la Combinación de Costos de Transporte y Secuencia de Explotación: Es posible tratar am

En los casos simultáneamente escalando los coeficientes de deseabilidad  $\{do_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$  y

$$\{dw_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\}$$

relativos a:

$$\{co_{ij}; i = 1, m; j = 1, s\} \text{ y}$$

$$\{cw_{ij}; i = 1, m; j = i, s\}$$

respectivamente.

Esto es, los "coeficientes de deseabilidad" deben ser escalados de tal modo que reflejen la importancia del problema de la secuencia de explotación con relación al problema de costos de transporte. El problema de optimización puede ser expresado como: Sujeto a las restricciones de (1) á (9), encontrar los valores para  $\{X_{ij}\}$  y  $\{Y_{ij}\}$  que minimice  $Z$ , donde:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s (co_{ij} - do_{ij}) X_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^s (cw_{ij} - dw_{ij}) Y_{ij} \quad (12)$$

## CAPITULO V

### SOLUCION DEL MODELO DE PLANEAMIENTO DE MINA

#### 5.0 Solución Técnica

Los procedimientos de P.L. del MPSX fueron utilizados para resolver el presente modelo. El Programa MPSX está compuesto por un conjunto de procedimientos, uno de los cuales trata sólo con problemas de P.L. El empleo de algunos de estos procedimientos se realiza mediante un compilador del programa de control.

Los procedimientos de Programación Lineal del MPSX emplean el "Método Simplex" revisado. La base de este método reside en que si hay  $m$  restricciones (o filas) que son linealmente independientes, entonces hay un conjunto de  $m$  columnas (variables o vectores) los cuales son también linealmente independientes. Por consiguiente cualquier vector del lado derecho (RHS) puede ser expresado como una combinación lineal de estas  $m$  columnas. El método Simplex emplea estas soluciones básicas, intercambiando, en cada iteración, un vector en la base con otro que no se encuentra en la misma hasta que se obtenga una solución básica. Después que se determina una solución básica, se analiza una serie de soluciones con el fin de obtener una que satisfaga los diferentes requerimientos y para la cual la función objetiva tiene un valor óptimo (máximo o mínimo).

## 5.1 Sistema de Información

Los costos asumidos en el presente estudio han sido recolectados de operaciones similares en varias minas a cielo abierto y desde que los parámetros y restricciones fueron obtenidos de planes anuales, algunas variaciones deben ser consideradas cuando se use el modelo para planes a corto plazo, tal como el adoptado en este modelo. Es función de la Empresa fijar objetivos operacionales (diario, semanal, etc.) dentro de la estructura de los planes a largo y mediano plazo.

El sistema considerado en este modelo consiste en dos (2) minas a cielo abierto, tal como se detalla en el Capítulo II.

## 5.2 Unidades de Producción y Tiempo Efectivo de Trabajo

Se ha considerado siete (7) unidades de producción en la mina 1 y tres (3) unidades de producción en la mina 2. El tiempo efectivo de trabajo por guardia de 8 horas es de 7.5 horas. No se considera tolerancias para la instalación y/o desplazamiento del equipo al inicio de la guardia o para el cambio de la cuadrilla durante las guardias. En la práctica, algunas unidades de producción no están disponibles durante la guardia o parte de ella debido a problemas de mantenimiento, demoras, etc. Esta posibilidad ha sido tomada en consideración en este modelo, asignando menos tiempo efectivo de trabajo a algunas unidades de producción. También son posibles las variaciones en las horas disponibles tota-

les por guardia para cada mina.

### 5.3 Control de Calidad

La importancia del control de calidad ya ha sido discutida. En el presente modelo, la calidad será determinada por el porcentaje de los siguientes componentes: Sílice, Alúmina, Materias Volátiles y Finos.

Los porcentajes mínimos y máximos del elemento  $k^{\text{th}}$  en el mineral, estimados para la Planta, se presenta en el Cuadro 2.

### 5.4 Capacidad de Carguío y Demanda del Sistema

Es usual en este tipo de operación dejar algunos carros vacíos al final de la guardia en las áreas de carguío; esto se ha considerado con el fin de evitar al comienzo de la guardia, la descarga de material en áreas de almacenamiento provisionales. El número de carros vacíos dejados en las áreas de carguío se asume en 70, con una capacidad de 90 toneladas cada uno; 45 carros para la mina 1 y 25 carros para la mina 2 respectivamente. Se programan dos convoyes con 150 carros cada uno, durante cada guardia, lo cual da una capacidad total de carguío de 33,300 toneladas por guardia. La demanda o producción mínima requerida ha sido estimada en 22,500 toneladas (250 carros/guardia). Es obvio que esto puede variar de acuerdo a la programación de los convoyes de carros y cambios en los planes de producción.

RANGOS DE LA LEY DE MINERAL

<u>k</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>MAXIMO (m<sub>k</sub>)*</u>	<u>MINIMO (i<sub>k</sub>)*</u>
1	SiO <sub>2</sub>	2.50	2.10
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50	1.30
3	Materias Volátiles	6.50	5.50
4	Finos	38.00	34.00
5	Fierro	No hay límites.	

\* Porcentaje.

### 5.5 Capacidad de Movimiento de Desmonte

Se ha asumido como relaciones de mineral/desmonte los valores de 3 y 8 para cada mina. Es indudable que dicha relación varía en algunas épocas del año y sus valores dependen de los niveles estimados de producción y de la capacidad total del sistema.

### 5.6 Costo de Transporte y Coeficientes de Deseabilidad

Toda la información concerniente a la capacidad de producción, costos, ley de mineral, costo de transporte, coeficientes de deseabilidad, etc., utilizados como información en este modelo se muestran en el Cuadro 3.

Los costos son considerados como información confidencial por muchas Empresas y en algunos casos son difíciles de estimar.

La administración o supervisión de la mina tiene que asignar un "coeficiente de deseabilidad" que sea equitativo a cada unidad de producción, reflejando en estos valores la importancia de la secuencia de explotación con relación a los costos de transporte, desde que en la generalidad de los casos los costos de transporte de mineral tienen un rango diferente al de desmonte. En tal sentido se han preparado dos diferentes "escalas de coeficientes de deseabilidad" con el objeto de resolver el problema de costos combinados y de secuencia. En el Cuadro 4 se presentan las escalas usadas en este modelo.

CUADRO Nº 3

CARACTERÍSTICAS DE LAS OPERACIONES UNITARIAS

ACTI VIDAD	CAPACIDAD DE PRO- DUCCION (hr/ton)	COSTO (US\$/ton)	COEFICIEN TE DE DE- SEABILIDAD	Ley %			
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*MV	Finos
X11	.0016	.070	.030	.60	2.90	7.00	0.00
X12	.0009	.066	.020	1.90	1.10	5.30	0.00
X13	.0011	.076	.020	3.30	1.30	5.90	100.00
X14	.0009	.055	.000	3.10	.70	4.10	100.00
X15	.0009	.077	.030	2.10	1.90	5.60	0.00
X16	.0011	.068	.010	1.20	1.60	6.40	20.00
X17	.0016	.080	.020	1.70	1.30	3.50	40.00
X21	.0016	.040	.030	2.00	1.90	5.80	10.00
X22	.0011	.045	.020	1.40	1.20	5.40	42.00
X23	.0009	.051	.010	2.60	1.40	3.40	85.00
Y11	.0011	.209	.110				
Y12	.0016	.219	.100				
Y13	.0009	.181	.130				
Y14	.0016	.163	.120				
Y15	.0011	.198	.130				
Y16	.0016	.174	.110				
Y17	.0011	.221	.110				
Y21	.0011	.200	.110				
Y22	.0011	.170	.120				
Y23	.0016	.181	.130				

\* MV = Materias Volátiles



COEFICIENTES DE DESEABILIDAD PARA MINERAL Y DESMONTE

	SECUENCIA		COSTO-SECUENCIA	
	Mineral ( $do_{ij}$ )	Desmonte ( $dw_{ij}$ )	Mineral ( $do_{ij}$ )	Desmonte ( $dw_{ij}$ )
Desarrollo	0.030	0.030	0.030	0.130
Plan Inmediato	0.020	0.020	0.020	0.120
Plan Futuro	0.010	0.010	0.010	0.110
Sin Plan	0.000	0.000	0.000	0.000

### 5.7 Sistema de Codificación

El presente Modelo de planeamiento a corto plazo consiste de 29 ecuaciones (incluyendo 3 diferentes funciones objetivas) y 20 variables para un horizonte de planeamiento de una guardia, considerando dos minas ( $i = 1, 2$ ) con siete unidades de producción en la mina 1 ( $S_1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  y  $7$ ) y tres unidades de producción en la mina 2 ( $S_2 = 1, 2, 3$ ). Igualmente se considera dos tipos de materiales, mineral (X's) y desmonte (Y's). La representación gráfica de la matriz se presenta en el Apéndice A.

El programa fue codificado para el MPSX; el listado de entrada (INPUT) y el de salida (OUTPUT) se muestran en el Apéndice B.

### 5.8 Análisis de los Resultados

Se han obtenido tres soluciones óptimas para los planes de producción, cada una de ellas optimizando una determinada función objetiva. Cada plan de producción satisface los requerimientos de ley de mineral, asignación de la producción, relación de desbroce y estimados de producción. Las soluciones óptimas están sumarizadas en los Cuadros 5, 6 y 7 y presentadas gráficamente en las Ilustraciones 3 al 8.

El Cuadro 5, muestra los resultados obtenidos con las tres diferentes funciones objetivas. La función objetiva "MIN COST" indica que la producción del sistema alcanzó su nivel más alto, es decir, 32,532 Tons. por guardia. Este va-

CUADRO Nº 5 RESULTADOS PARA TRES DIFERENTES FUNCIONES OBJETIVAS. DEMANDA = 22,500 TONS/GUARDIA

	MINCOST			MINSEQ			COSTSEQ		
	<u>Mina 1</u>	<u>Mina 2</u>	<u>Sistema</u>	<u>Mina 1</u>	<u>Mina 2</u>	<u>Sistema</u>	<u>Mina 1</u>	<u>Mina 2</u>	<u>Sistema</u>
Producción de Mineral (Tons)	22,796	9,736	32,532	18,000	4,500	22,500	18,202	7,869	26,071
Remoción de Desmonte (Tons)	7,598	1,216	8,814	16,990	6,783	23,773	10,733	2,500	13,233
Relación de Desbroce	3.0	8.0	3.7	1.1	0.7	0.9	1.7	3.1	2.0
Ley del Mineral (%)									
SiO <sub>2</sub>	2.28	1.68	2.10	2.19	1.76	2.10	2.25	1.76	2.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	1.53	1.50	1.47	1.62	1.50	1.45	1.62	1.50
Materias Volátiles	5.46	5.59	5.50	5.46	5.64	5.50	5.44	5.63	5.50
Finos	42.87	26.59	38.00	36.76	23.00	34.00	44.00	23.00	37.60
Total de Material (Tons)	30,394	10,952	41,346	34,990	11,283	46,273	28,935	10,369	39,304

lor es bastante próximo a la capacidad de carguío del sistema, la cual es de 33,000 tons/guardia. La función objetiva "MINSEQ" indica que la producción obtenida fue la mínima requerida, es decir 22,500 ton/guardia. El exceso del tiempo de trabajo del equipo fue empleado en la remoción del desmonte.

La función objetiva "MINCOST" considera que la relación de desbroce para las minas fue mantenida al mínimo requerido, es decir, 3.0 para la mina 1 y 8.0 para la mina 2. La relación total de desbroce del sistema fue de 3.7. Estos indicadores disminuyen considerablemente en el caso de la función objetiva "MINSEQ" donde la cantidad de desmonte removida en el sistema (23,773 tons/guardia) fue mayor que la producción de mineral.

El Cuadro 5, muestra también que para la tercera función objetiva "COSTSEQ" los niveles de producción de mineral y remoción de desmonte fueron mantenidos en puntos intermedios de los valores extremos obtenidos por "MINCOST" y "MINSEQ".

La ley de mineral fue la misma en todos los casos, 2.1%, 1.5% y 5.5% para sílice, alumina y materias volátiles respectivamente. La producción de finos del sistema fue el máximo con la función objetiva "MINCOST" (38%), el mínimo requerido con la función objetiva "MINSEQ" (34%) y con la función objetiva "COSTSEQ" (37.6%).

La diferencia existente en las operaciones de producción de mineral y remoción de desmonte en los tres casos se encuen-

tran reflejada en la cantidad total de material removido en el sistema. Estas cifras indican que el valor más alto fue obtenido con la función objetiva "MINSEQ" con un total de 46,273 tons.

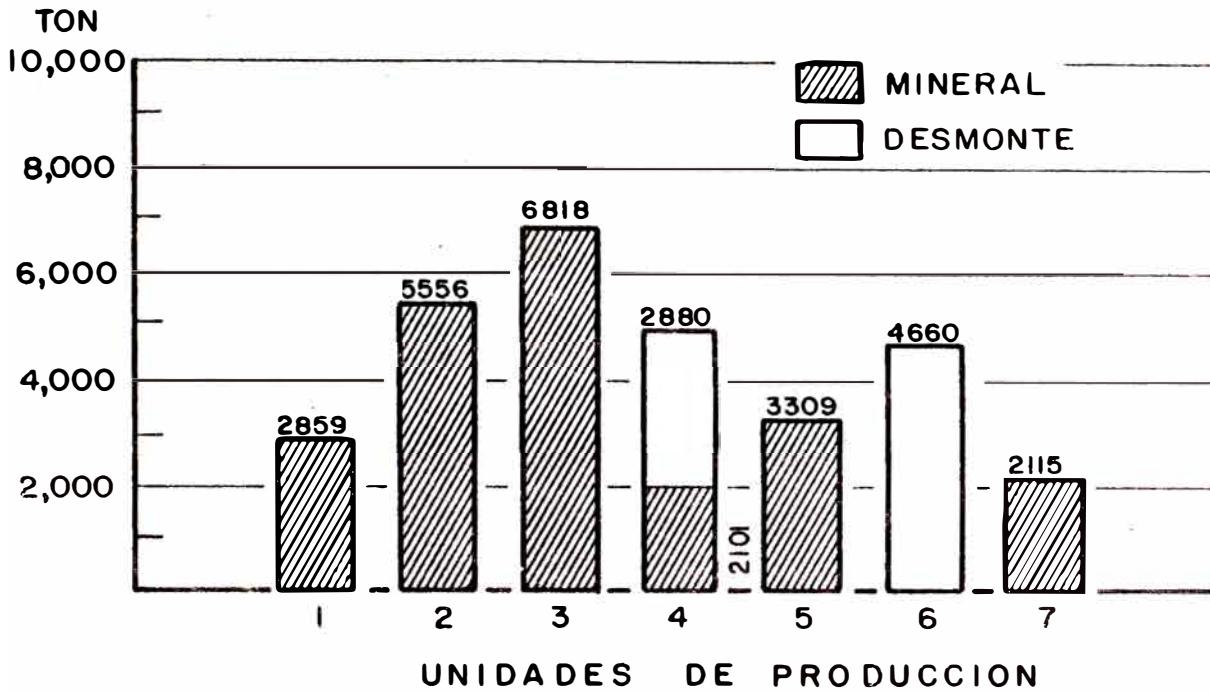
### 5.9 Programación de la Producción

Los planes de producción obtenidos como resultado de las tres funciones objetivas, se encuentran en el Cuadro Nº 6 y están representados gráficamente en las Ilustraciones Nº 3 al Nº 8. En el caso de "MINCOST" la mayor parte de la producción fue reservada para las unidades de producción 1, 2, 3, 4, 5, 7 en la mina 1 y las unidades de producción 1 y 2 en la mina 2.

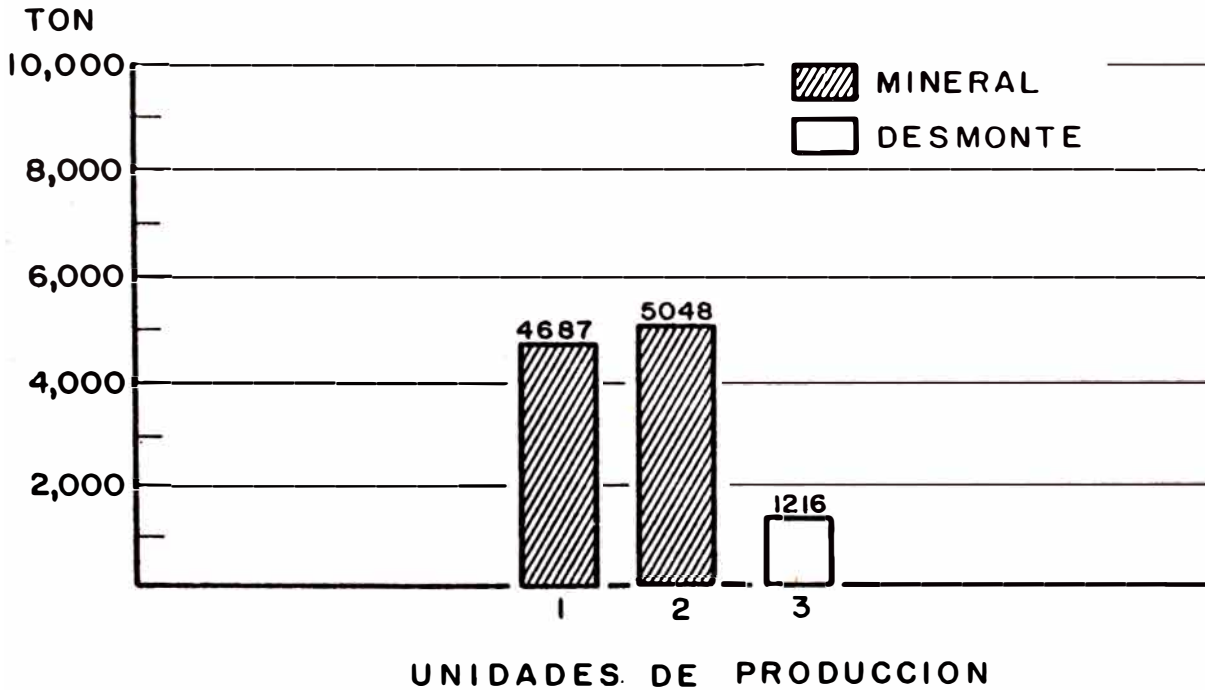
En la mina 1, las unidades 4 y 6, y en la mina 2, la unidad 3, fueron asignados a la remoción de desmonte. El incremento en la remoción de desmonte con la función objetiva "MINSEQ" causó cambios significativos en las operaciones de producción de las unidades 3 a la 7 en la mina 1 y para la producción de las unidades 1 y 2 de la mina 2. La unidad de producción 7 fue programada totalmente para remoción de desmonte; se nota un cambio de producción de mineral a desmonte en las unidades 3 y 5 de la mina 1 y la unidad 2 en la mina 2. Se notan los siguientes cambios con la función objetiva "COSTSEQ", en comparación con las funciones objetivas "MINCOST" y "MINSEQ". Las unidades de producción 4 y 5 de la mina 1 están programadas para incrementar la remoción de desmonte y disminuir la producción de mineral respectiva

CUADRO Nº6 PROGRAMACION DE LA PRODUCCION (TONS)

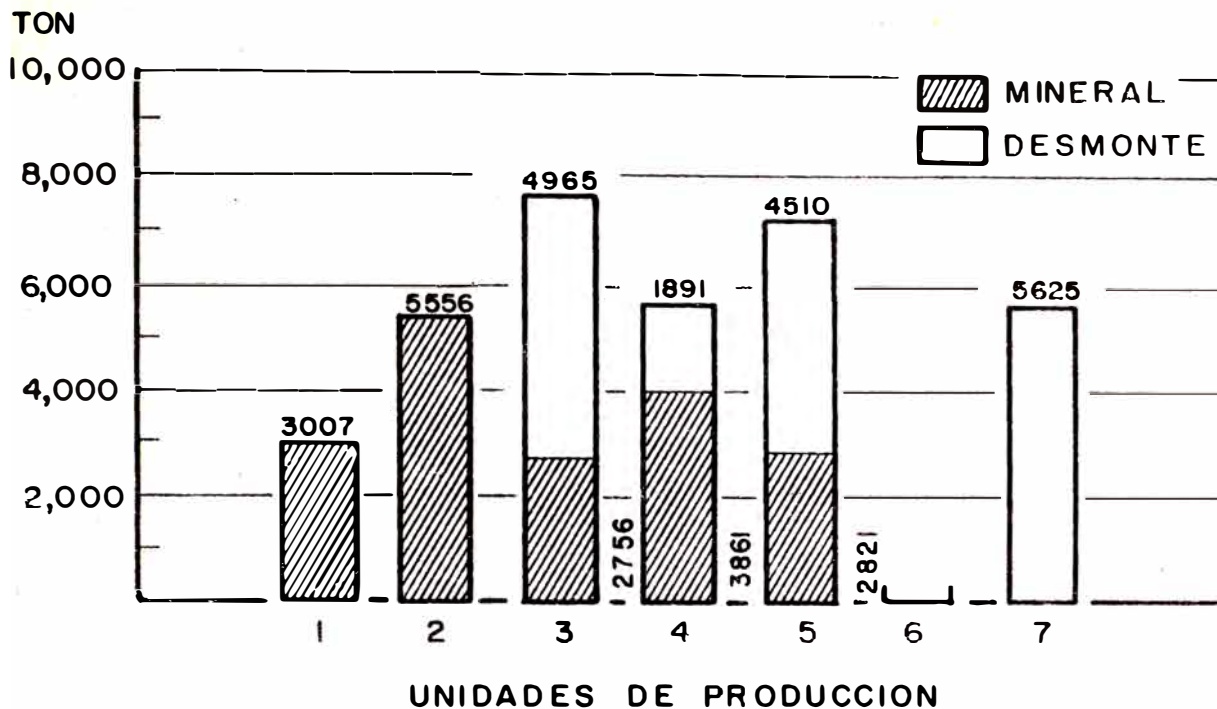
<u>Mina</u>	<u>Unidad de Producción</u>	<u>MINCOST</u>		<u>MINSEQ</u>		<u>COSTSEQ</u>	
		<u>Mineral</u>	<u>Desmante</u>	<u>Mineral</u>	<u>Desmante</u>	<u>Mineral</u>	<u>Desmante</u>
1	1	2,859	-	3,007	-	2,121	-
1	2	5,556	-	5,556	-	5,556	-
1	3	6,818	-	2,756	4,965	6,818	-
1	4	2,101	2,880	3,861	1,891	-	4,062
1	5	3,309	-	2,821	4,510	727	1,984
1	6	-	4,660	-	-	-	4,687
1	7	2,115	-	-	5,625	2,979	-
2	1	4,687	-	2,675	-	4,687	-
2	2	5,048	-	1,824	4,283	3,182	-
2	3	-	1,216	-	2,500	-	2,500



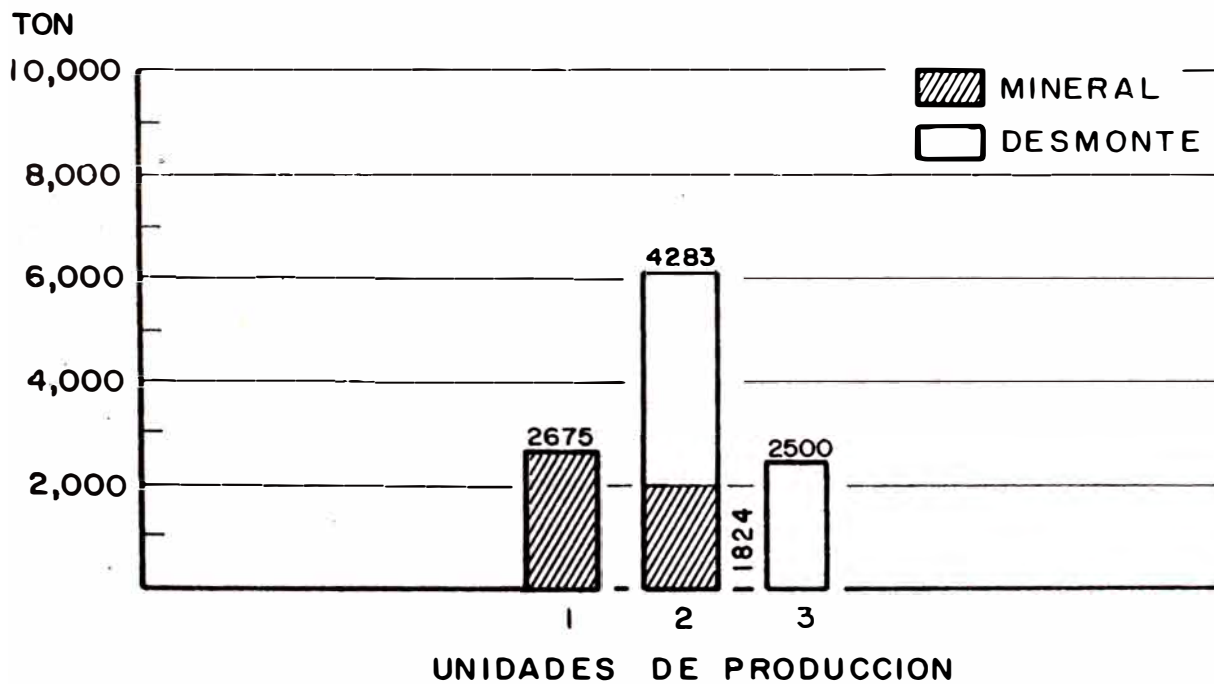
ILUSTRACION N° 3 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 1, FUNCION OBJETIVA "MINCOST"



ILUSTRACION N° 4 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 2, FUNCION OBJETIVA "MINCOST"

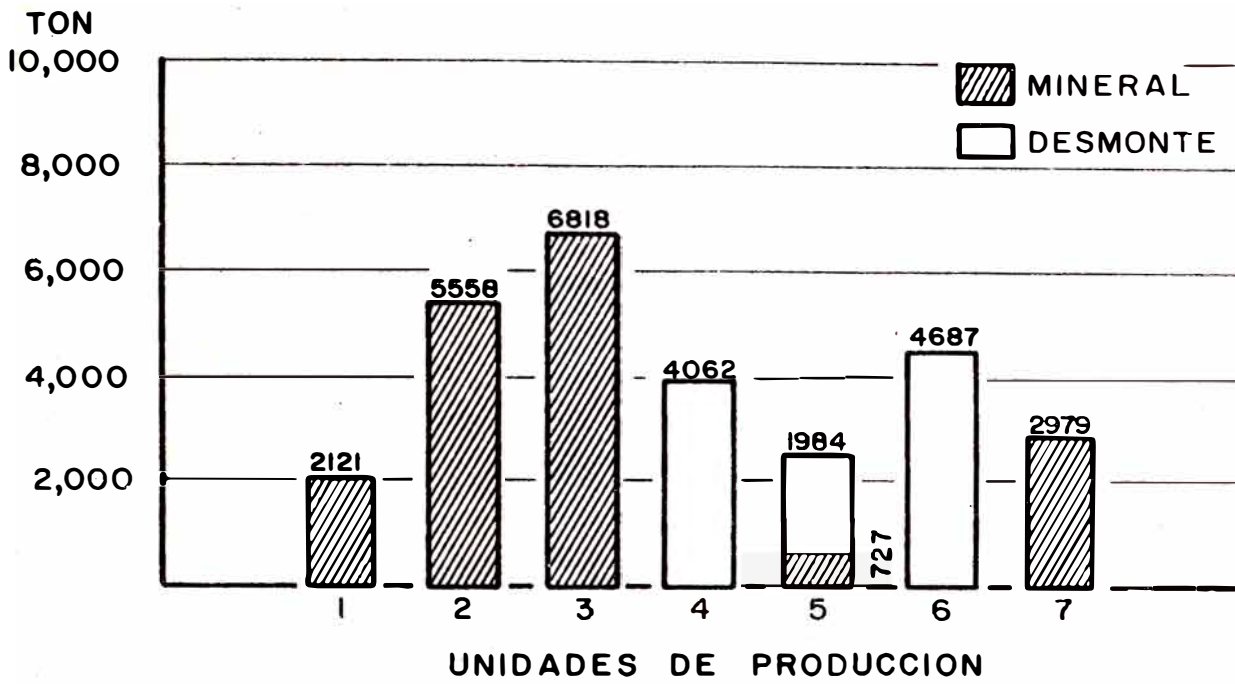


ILUSTRACION Nº 5 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 1, FUNCION OBJETIVA "MINSEQ"

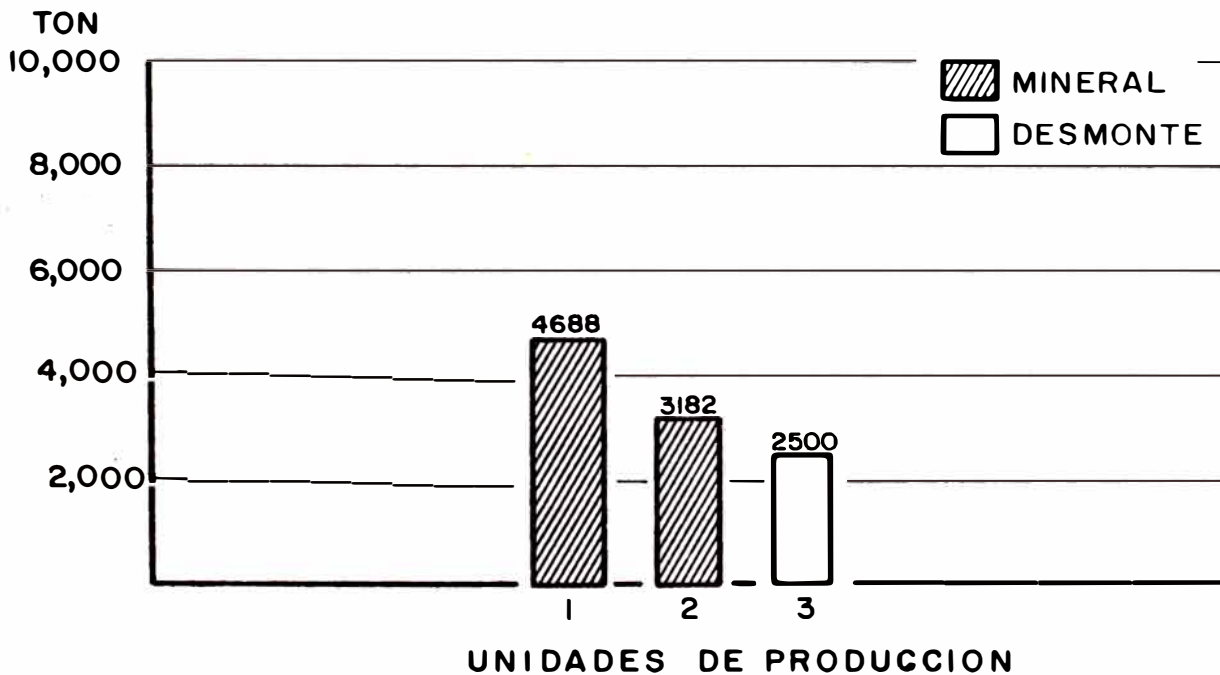


ILUSTRACION Nº 6 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 2, FUNCION OBJETIVA "MINSEQ"





ILUSTRACION Nº 7 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 1, FUNCION OBJETIVA "COSTSEQ"



ILUSTRACION Nº 8 PLAN DE PRODUCCION DE LA MINA 2, FUNCION OBJETIVA "COSTSEQ"

mente.

El Cuadro Nº 7 muestra la utilización del equipo durante el período de planeamiento considerado. Todas las Unidades de producción fueron usadas cuando se empleó "MINCOST" y "COSTSEQ" como funciones objetivas, sin embargo, alguna de ellas tales como las unidades de producción 1, 5, y 7 fueron programadas parcialmente durante la guardia. En el caso de "MINSEQ" en la unidad de producción 6 fue el único equipo que no fue programado. En las otras el equipo fue parcialmente o totalmente empleado durante la guardia.

#### 5.10 Comparación de Resultados

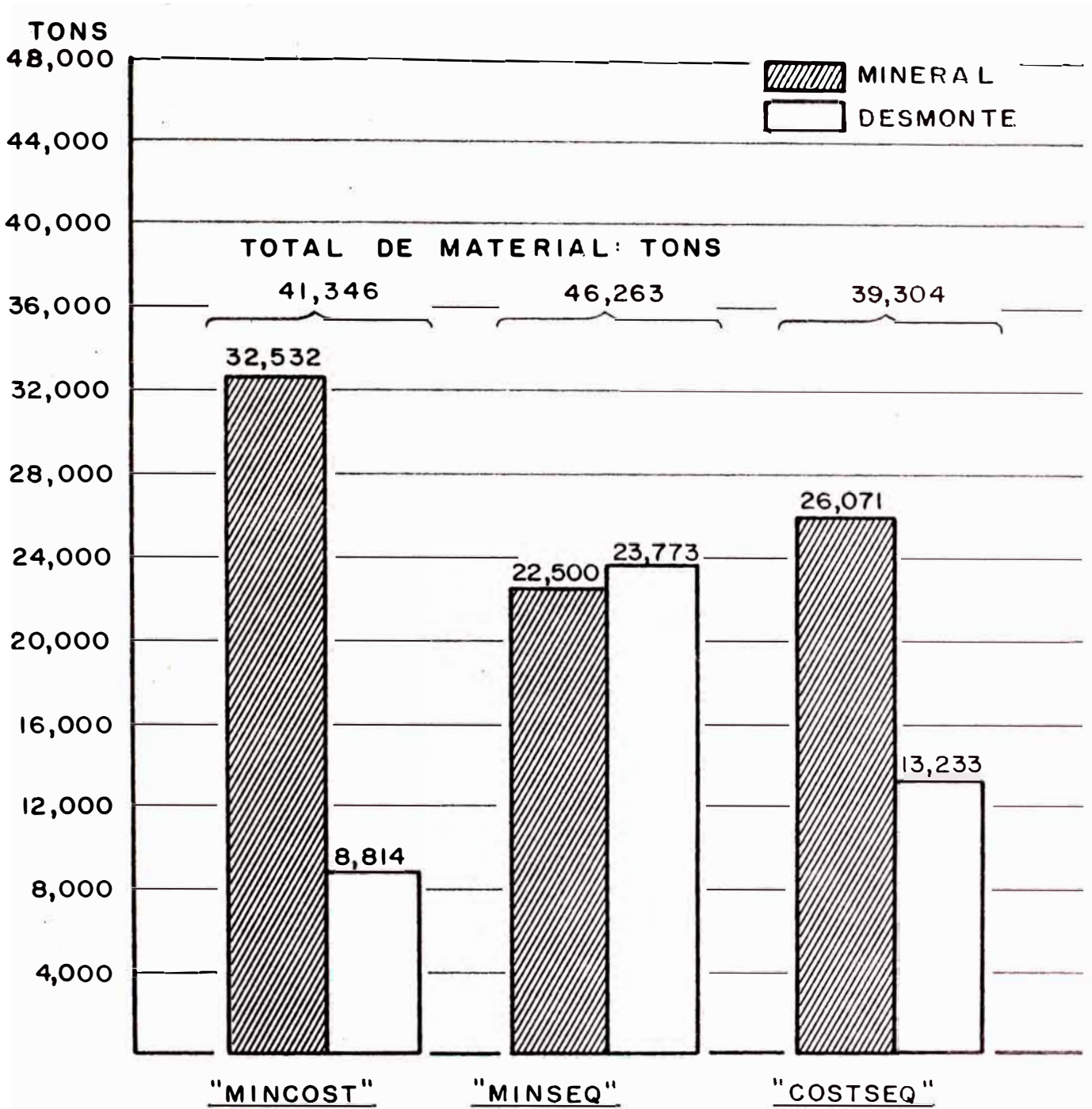
Con el fin de comparar las soluciones obtenidas usando las tres funciones objetivas, se deberá referir a la Ilustración Nº 9 y Cuadro Nº 5.

Los planes de producción de mineral y remoción de desmonte se presentan en la Ilustración Nº 9 para las funciones objetivas "MINCOST" "MINSEQ" y "COSTSEQ". Las diferencias fundamentales encontradas se sumarán a continuación.

- a. Producción de Mineral: La producción obtenida con la función objetiva "MINCOST" alcanzó el nivel más cercano de la capacidad total de carguío del sistema. La producción "MINSEQ" por otro lado, no excedió el mínimo requerido.
- b. Movimiento de Desmonte: La cantidad de desmonte movido con "MINSEQ" fue dos veces mayor que la de "MINCOST".

CUADRO Nº 7 UTILIZACION DEL EQUIPO DE CARGUIO (HORAS)

<u>Mina</u>	<u>Unidad de Producción</u>	<u>MINCOST</u>		<u>MINSEQ</u>		<u>COSTSEQ</u>	
		<u>Disponi- bles</u>	<u>Usadas</u>	<u>Disponi- bles</u>	<u>Usadas</u>	<u>Disponi- bles</u>	<u>Usadas</u>
1	1	7.5	4.6	7.5	4.8	7.5	3.4
1	2	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
1	3	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
1	4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
1	5	7.5	3.0	7.5	7.5	7.5	2.8
1	6	7.5	7.5	7.5	-	7.5	7.5
1	7	7.5	3.4	7.5	6.2	7.5	4.8
	TOTAL	49.0	37.5	49.0	37.5	49.0	37.5
2	1	7.5	7.5	7.5	4.3	7.5	7.5
2	2	7.5	5.5	7.5	6.7	7.5	3.5
2	3	4.0	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	TOTAL	19.0	15.0	19.0	15.0	19.0	15.0



ILUSTRACION Nº 9

PLAN DE PRODUCCION DE MINERAL Y REMOCION DE DESMONTE UTILIZANDO DIFERENTES FUNCIONES OBJETIVAS.

La relación de desbroce mineral/desmante refleja las actividades en otra área con relación a la producción de mineral. En efecto, para el sistema la relación de desbroce obtenida con "MINCOST" fue cuatro veces mayor que la de "MINSEQ".

Estas diferencias indican el rol importante que tienen los costos de transporte. Con una función objetiva minimizando costos, mayores niveles de actividad en la solución óptima se esperan para aquellas variables cuyos coeficientes en la función objetiva son menores. Falta de flexibilidad en la localización de canchas de desmonte determinan mayores distancias de acarreo de mineral y desmonte.

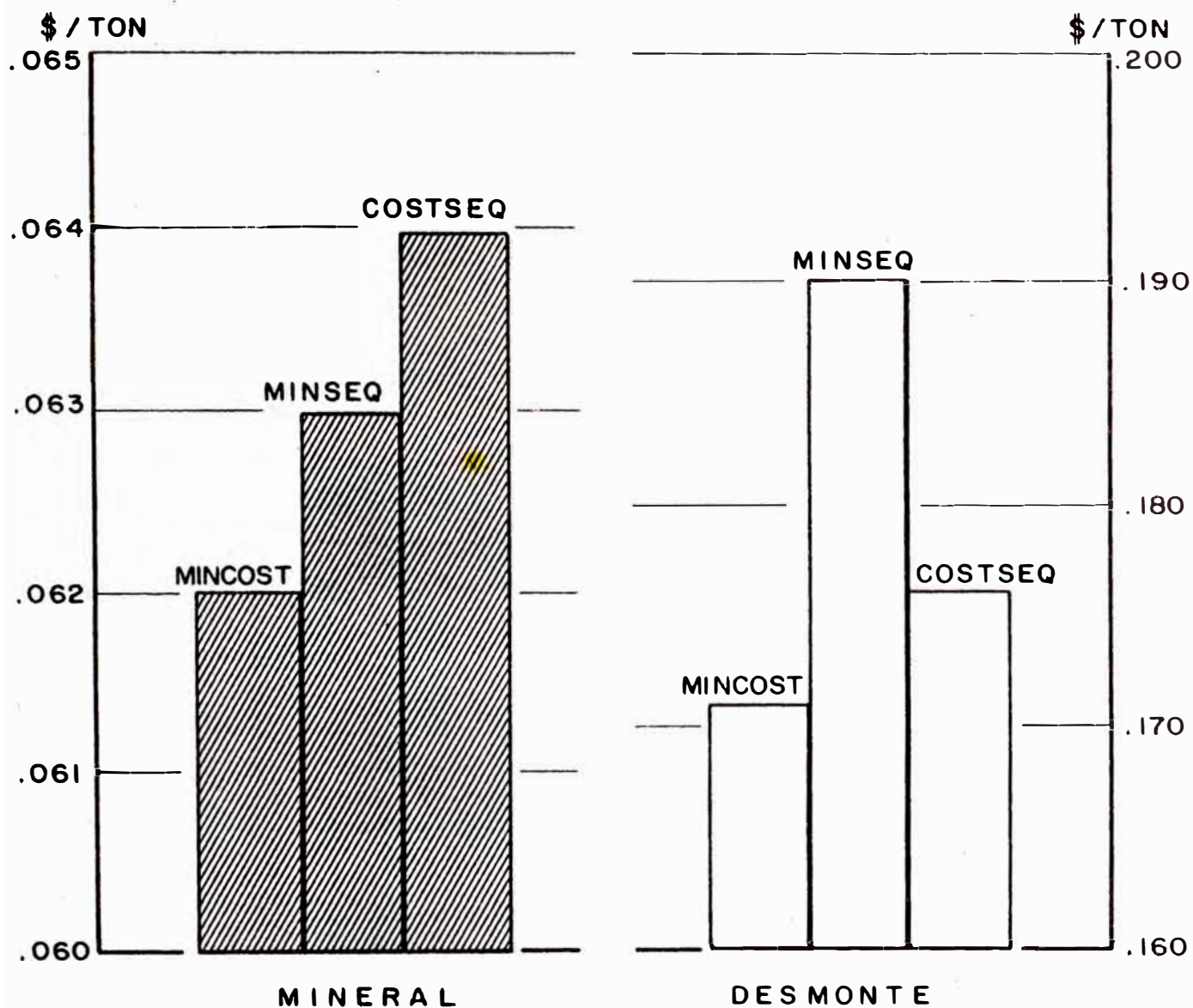
En la función objetiva "MINSEQ" los valores empleados para los "coeficientes de deseabilidad" son los mismos para una unidad que se encuentra operando en mineral o desmonte, además es una función de maximización. Es por ello que, una vez que se satisfaga los requerimientos de la producción mínima (22,500 ton/guardia), el programa incrementa el nivel de las actividades para la remoción de desmonte con el fin de encontrar una solución óptima. Esto es posible debido a la gran flexibilidad del modelo en la remoción de desmonte y el pequeño número de ecuaciones que restringen esta condición.

La solución con la tercera función objetiva "COSTSEQ", considera las soluciones extremas obtenidas en los ca -

sos anteriores. Desde que dos diferentes escalas de "coeficientes de deseabilidad" fueron preparadas tomando en consideración la diferencia en los costos de transporte para mineral y desmote, la producción está programada de tal modo que los niveles de actividad de producción de mineral y remoción de desmote están localizados entre los mínimos y máximos considerados.

- c. Costos Unitarios de Transporte: El Cuadro Nº 8 está preparada para mostrar el valor de todas las funciones objetivas, cuando una sola de ellas es usada para estimar el plan de producción. Como se puede apreciar, el costo de transporte con las funciones objetivas "MINSEQ" y "COSTSEQ" es de \$ 5,929 y \$ 3,982 respectivamente. A fin de ayudar a analizar esto posteriormente, se han calculado los costos promedio unitarios de transporte correspondiente a desmote y mineral para las tres funciones objetivas y se muestran en la Ilustración Nº 10. En el Cuadro Nº 8 e Ilustración Nº 10 los costos de transporte para las funciones objetivas "COSTSEQ" y "MINCOST" no varían demasiado.

Las pequeñas diferencias pueden interpretarse como el costo de seguir una predeterminada secuencia de explotación. Diferente a estas dos funciones objetivas es la función "MINSEQ". Esta no es restringida o limitada ya sea implícita o explícitamente, de allí que el alto costo unitario y total de transporte sea inevitable ya que



ILUSTRACION Nº 10

COSTOS UNITARIOS PROMEDIO DE  
TRANSPORTE UTILIZANDO DIFERENTES  
FUNCIONES OBJETIVAS.

CUADRO Nº 8. INTERRELACION DE LOS VALORES DE LAS TRES FUNCIONES OBJETIVAS PARA LOS TRES PLANES DE PRODUCCION.

FUNCION OBJETIVA	FUNCION OBJETIVA OPTIMIZADA		
	MINCOST	MINSEQ(*)	COSTSEQ
MINCOST	US\$ 3,554	US\$ 5,929	US\$ 3,982
MINSEQ	859	996	859
COSTSEQ	1,813	2,549	1,798

(\*) Las sumas indicadas en la Tabla son los valores alcanzados por las diferentes funciones objetivas cuando solo una de ellas es optimizada. Por ejemplo cuando la función objetiva "MINSEQ" es optimizada (2da. columna), el costo de transporte para el plan es US\$ 5,929 y el valor de la función objetiva "COSTSEQ" es de US\$ 2,549.



los equipos son empleados a máxima capacidad.

Desde que el tonelaje total acarreado por el sistema difiere para cada función objetiva y las limitaciones de transporte no están explícitamente expresadas, el costo total de transporte no es un buen estimado para comparar las funciones objetivas.

## CAPITULO VI

### ANALISIS POST-OPTIMO

#### 6.0 Generalidades

Es indudable que ni el analista o el ejecutivo que tome las decisiones, pueden estar convencidos plenamente con un plan de asignación de recursos que sea óptimo para un determinado conjunto de restricciones. Se necesitan conocer las diferencias con el mejor plan y los parámetros que son particularmente sensibles en la solución óptima. Es por ello que el analista necesita estimar el índice de cambio del valor de la solución óptima con relación a cambios de los valores asumidos o estimados en los parámetros del modelo, y el rango de los valores sobre los cuales cualquier plan particular de asignación de recursos es óptimo. Esta información se obtiene mediante el análisis post-óptimo.

#### 6.1 Análisis Post-Óptimo del Sistema de Programación Matemática "MPSX"

El MPSX cuenta con una serie de procedimientos, los cuales permiten al usuario hacer análisis post-óptimos del modelo en estudio. Utilizando el programa de control, es posible determinar el rango bajo el cual un determinado término independiente (RHS) puede variar en una u otra dirección, mientras se mantienen constantes los valores de los otros términos independientes.

Es posible igualmente analizar la solución óptima cuando más

de un término y/o coeficiente varía en un determinado rango de valores. Esto se llama "programación paramétrica".

Una vez que la solución óptima ha sido obtenida los siguientes procedimientos analizan el cambio en la solución cuando se varían ya sean los términos independientes (RHS), los coeficientes de la función objetivo o coeficientes de la matriz o se varían simultáneamente los términos independientes y los coeficientes de la función objetivo:

**RANGE** : Para variables, determina el rango del costo de entrada para los cuales la solución óptima permanece inalterable; para restricciones, determina el rango de los términos independientes (RHS) para los cuales la solución óptima permanece inalterable.

**PARAOBJ** : Realiza variaciones paramétricas de la función objetivo.

**PARARHS** : Realiza variaciones paramétricas en los términos independientes (RHS).

**PARARIM** : Realiza variaciones paramétricas en los términos independientes (RHS) y la función objetivo simultáneamente.

**PARACOL** : Realiza variaciones paramétricas en una columna específica de la matriz del modelo.

**PARAROW** : Realiza variaciones paramétricas en una línea determinada de la matriz del modelo.

La disponibilidad de estos procedimientos de programación

paramétrica permite al planificador realizar simulaciones usando P.L.; el resultado de tales simulaciones es tal, que se sugiere diferentes estrategias operativas para variaciones en la disponibilidad de recursos y/o costos.

Lo abstracto y la naturaleza de los "Coeficientes de deseabilidad" y los coeficientes "COSTSEQ", hacen difícil su programación para análisis paramétricos. Es por ello, que el análisis post-óptimo se realiza en el modelo sólo con la función objetiva "MINCOST".

## 6.2 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad ha sido definido como un análisis del efecto en la solución óptima de un problema de P.L. como resultado de las variaciones en los coeficientes de entrada y salida, coeficientes de costos y constantes. El análisis de sensibilidad es una parte muy importante en un problema de P.L., considerando que el trabajo debe ser completo y productivo en su máxima extensión.

La información que puede ser obtenida a través de un análisis de sensibilidad del problema, puede ser tan significativo como la solución óptima. Los siguientes ejemplos ayudarán a clarificar el uso del análisis de sensibilidad. En el problema que se discute en este estudio, tal análisis puede responder a las siguientes preguntas que puedan haber cuando exista la posibilidad de programar una nueva unidad de producción:

- a. ¿Es rentable operar la unidad de producción, si hay cierto beneficio involucrado en la producción de una tonelada adicional?
- b. ¿En cuánto tendría que incrementarse el beneficio por tonelada de la nueva unidad de producción, antes que sea rentable producirla?
- c. ¿En cuánto tendría que disminuirse el costo de extracción de una tonelada de la nueva unidad de producción, antes que sea rentable producirla?
- d. ¿Cuál es la fórmula que debe ser usada para determinar si es o no rentable producir mineral de la nueva unidad de producción, cuando el costo o la ganancia involucrado en la producción de una tonelada en la nueva unidad de producción es desconocido?
- e. ¿Sin una reducción en la ganancia total, cuántas toneladas pueden ser producidas en la nueva unidad de producción y cuál será su efecto en la producción de las otras unidades de producción?
- f. ¿Cuál es el efecto de incrementar la capacidad de una unidad de producción con relación a la ganancia de la mina y la producción en las otras unidades de producción?
- g. ¿En qué rango puede variar el costo de extracción de una tonelada en una unidad de producción, sin cambiar la solución del plan óptimo?
- h. ¿Qué pasaría en el beneficio de la mina y/o la produc

ción en otras unidades de producción, si el costo de producción de una tonelada cambia en una unidad de producción?

### 6.3 Costos Marginales

Los costos marginales pueden ser clasificados en dos categorías principales:

- a. Aquellos costos que describen la proporción de cambio del valor de la función objetiva si una actividad que no forma parte de la solución óptima es introducida en la solución. En este caso, el costo marginal representa aquel costo que es "demasiado caro" para ser incluida en el plan de operaciones. Por ejemplo el plan operativo estimado para la solución óptima "MINCOST" se muestra en el Cuadro N° 9. De esto se deduce que la unidad de producción 13, ha sido programada totalmente para producción de mineral. El Cuadro N° 10 muestra que el incremento de costo originado al desviarse del plan (remoción de desmonte) es \$ 0.087/Ton. Esto significa que a pesar que la remoción de este desmonte es altamente "Deseable" (etapa de desarrollo), esta actividad no es seleccionada en el plan de operación porque \$ 0.087 /Ton, es "demasiado caro". De igual modo si la administración de la mina puede disminuir el costo de acarreo de desmonte de \$ 0.181 a \$ 0.094/Ton, entonces la unidad de producción 13 puede también ser programada para remoción de desmonte, como se aprecia en el Cuadro N°12.

CUADRO Nº 9    PLAN DE PRODUCCION MEDIANTE LA FUNCION OBJETIVA "MINCOST"

Tipo de Material	TOTAL DE MATERIALES EXPLOTADO POR UNIDAD DE PRODUCCION									
	M i n a 1							Mina 2		
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
Mineral	2,859	5,556	6,818	2,101	3,309	-	2,115	4,687	5,048	-
Desmonte	-	-	-	2,880	-	4,660	-	-	-	1,217
Tiempo Ocioso (horas)	2.9	-	-	-	4.5	-	4.1	-	1.9	2.0
Total Tiempo Disponible (Horas)	7.5	5.0	7.5	6.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	4.0

CUADRO Nº 10    ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PLAN DE PRODUCCION

CAPACIDAD ADICIONAL DE LA UNIDAD DE PRODUCCION		CASTIGO POR DESVIARSE DEL PLAN DE PRODUCCION US \$/Ton.	
UNIDAD DE PRODUCCION	US \$/Hora	MINERAL	DESMONTE
11	0.0	--	0.011
12	80.5	--	0.087
13	88.0	--	0.087
14	61.0	--	--
15	0.0	--	--
16	54.0	--	--
17	0.0	--	0.023
21	13.5	--	0.061
22	0.0	--	0.016
23	0.0	0.118	--



- b. Los costos ocultos estan asociados con las variables excedentes y artificiales. Estas son indicativas del cambio del valor de la función objetiva cuando los requerimientos de producción o la disponibilidad de los recursos cambian (Apéndice C).

Del Cuadro Nº 10 se puede deducir que los costos ocultos asociados con la variable excedente indican que el valor de la capacidad no utilizada de la unidad de producción 12 es de \$ 80.50/hora. Esto significa que si hubiese una hora menos en la capacidad de producción en esta unidad, el costo total de acarreo se incrementaría en \$ 80.50, debido a las modificaciones necesarias en las operaciones de las otras unidades de producción. Por otro lado, si una hora adicional en la capacidad de producción de esta unidad hubiera sido programada, el costo total de acarreo hubiese disminuído en \$ 80.50. Con esta información la supervisión puede evaluar la conveniencia de ampliar la disponibilidad de esta unidad de producción a una guardia completa. Sin embargo, estos valores deben ser empleados con bastante cautela, debido a la naturaleza no lineal de las relaciones costo-capacidad.

#### 6.4 Rango de Variación de los Costos

Además de la solución óptima, es necesario conocer la estabilidad de la solución, determinando los rangos sobre los cuales los costos pueden variar sin afectar la solución óptima. La información sobre los rangos de costos para algu-

nas de las actividades programadas en el presente modelo pueden ser obtenidas de la salida (OUTPUT) del MPSX, Listado de Salida de Columnas al Nivel Intermedio ("range of columns at intermediate level") que se muestra el Apéndice C. Por ejemplo, la unidad de producción 12 fue programada para producir mineral (5,555.5 tons) durante todo el tiempo disponible. El costo que se muestra para esta actividad fue ---- \$ 0.066/Ton. La información que se muestra bajo las columnas Actividad Superior e Inferior ("Lower and upper activity") y Costo Superior e Inferior ("upper and lower cost") indican que si por alguna razón el costo unitario de acarreo se incrementa a \$ 0.115/Ton., el nivel de dicha actividad disminuirá a 1,506.3 Tons., es decir aproximadamente el 25% del nivel original.

La actividad Y13, considerada altamente deseable (etapa de desarrollo) para propósitos de explotación, no fue programado por la solución óptima. El Listado de Columnas al Nivel Limite ("range of columns at limit level") presentado en el Apéndice C, muestra que cuando el costo unitario de transporte disminuye de \$ 0.181 á \$ 0.094/Ton., Y13 estará en la solución óptima con un valor de 983 Ton.

#### 6.5 Rango de Variación de los Términos Independientes

Los rangos de los términos independientes indican la cantidad sobre la cual los requerimientos o disponibilidad de los recursos pueden variar sin cambiar las bases de la solución óptima. Estos rangos sólo se aplican a las restricciones

iniciales del plan.

En el modelo bajo estudio, el Listado de Filas al Nivel Límite ("range of rows at limit level") presentado en el Apéndice C, indica muy pequeñas tolerancias para el tiempo total de trabajo disponible para la cuadrilla de la mina 1. La disponibilidad que se estimó fue de 37.5 horas/guardia y los límites inferior y superior son 37.4 y 38.4 horas/guardia respectivamente.

Este listado también indica que la Mina 2 tendrá una menor sensibilidad en el rango de variación para el mismo recurso. El límite inferior, en este caso el de mayor influencia para alcanzar los requerimientos puede disminuir hasta 9.7 horas/guardia, lo cual significa un margen de más de 5.0 horas antes que las bases de la solución óptima varíen.

La existencia de poca flexibilidad en la disponibilidad de recurso para la Mina 1 indica que debe realizarse investigaciones ulteriores en las soluciones con la finalidad de cubrir variaciones en esta área. Los procedimientos de programación paramétrica son útiles y aplicables a este respecto.

## 6.6 Procedimientos de Programación Paramétrica

La Programación Paramétrica Lineal analiza el comportamiento de la solución óptima como resultado de variaciones en los parámetros del problema.

Algunos de los procedimientos de programación paramétrica

disponibles en el MPSX fueron usados en este estudio con el propósito de mostrar su aplicabilidad y utilidad en la de terminación de diferentes estrategias de operación. Los procedimientos paramétricos fueron aplicados a los términos independientes correspondiente al tiempo total disponible de trabajo para las cuadrillas de las Minas 1 y 2. El programa de control se muestra en el Apéndice C y los resultados en el Cuadro Nº 11. Los resultados muestran la variación del número disponible de cuadrillas cuando el sistema varia. En el caso de 6 cuadrillas el análisis paramétrico sugiere la utilización de 4 cuadrillas en la Mina 1, y 2 cuadrillas en la Mina 2. La decisión está basada en el costo unitario de transporte para el total de material removido, el cual alcanza su menor valor cuando se emplea la combinación mencionada anteriormente.

El mismo análisis se hace utilizando 7 y 8 cuadrillas en el sistema y los resultados indican que para un total de 7 cuadrillas, 5 son asignadas a la Mina 1, y 2 a la Mina 2; y para un total de 8 cuadrillas, 6 son asignadas a la Mina 1 y 2 a la Mina 2.

En resumen los resultados indican que cuando se tiene más de una cuadrilla disponible en el sistema, ésta debe ser utilizada en la Mina 1, y si por alguna razón este número debe ser reducido de 7 á 6, esta reducción debe ser hecha en la Mina 1.

El rango el costo parametrizado es similar que en la pro

CUADRO Nº 11      PROGRAMACION PARAMETRICA DE LOS TERMINOS INDEPENDIENTES, ASIGNACION DE CUADRILLAS EN EL SISTEMA

TOTAL DE CUADRILLAS EN EL SISTEMA	TIEMPO TOTAL DISPONIBLE		S I S T E M A			COSTO UNITARIO TOTAL DEL MATERIAL (US \$/Ton)
	MINA 1 (horas)	MINA 2 (Horas)	PRODUCCION DE MINERAL (Tons)	REMOCION DE DESMONTE (Tons)	RELACION DE DESBROCE (Mineral/Desmonte)	
	6	37.5	7.5	26,378	9,049	
	30.0	15.0	27,659	9,855	2.81	.079
7	37.5	15.0	32,532	8,816	3.69	.086
	30.0	22.5	-	-	-	-
	45.0	7.5	30,303	13,887	2.18	.104
8	45.0	15.0	33,300	15,051	2.21	.101
	37.5	22.5				

gramación paramétrica lineal, radicando la diferencia en que los vectores de los términos independientes (RHS) permanecen constante, cuando uno o más costos y/o ganancias varían. Se utiliza el PARAOBJ para efectuar la programación paramétrica de la función objetiva. El programa de control se muestra en el Apéndice C y los resultados en el Cuadro Nº12. Como se ha demostrado en la sección correspondiente al rango de variación de los costos, la actividad Y13 no fue programada en la solución original. Con el fin de incluir esta actividad en la solución óptima se disminuyó su costo de \$ 0.181 a \$ 0.094/Ton. El Cuadro Nº 12 muestra las variaciones en el programa operacional, donde este costo toma valores menores que el original. También indica que muchos de los cambios fueron hechos disminuyendo el movimiento de desmonte en la unidad de producción número 4.

CUADRO Nº 12 RANGOS DEL COSTO PARAMETRIZADO DE LA ACTIVIDAD Y13

ACTIVIDAD	COSTO DE TRANSPORTE ACTIVIDAD Y13 (US\$/TON)		
	0.181	0.094	0.041
X11	2,859	3,298	4,051
X12	5,556	5,556	5,556
X13	6,818	6,014	4,405
X14	2,101	3,484	5,751
X15	3,309	3,743	4,019
X16	-	-	-
X17	2,115	1,367	-
Y11	-	-	-
Y12	-	-	-
Y13	-	983	2,949
Y14	2,880	2,103	827
Y15	-	-	820
Y16	4,660	4,616	4,687
Y17	-	-	-
X21	4,687	4,687	4,687
X22	5,048	5,048	5,048
X23	-	-	-
Y21	-	-	-
Y22	-	-	-
Y23	1,217	1,217	1,366

## CAPITULO VII

### SUMARIO

#### 7.1 GENERALIDADES

El propósito del presente estudio fue aplicar la técnica de programación lineal en el planeamiento a corto plazo de la producción de una mina a cielo abierto. El modelo fue desarrollado para un sistema que consiste de dos mina a cielo abierto con varias unidades de producción cada una. Se planearon y optimizaron tres funciones objetivas en el modelo, el costo de transporte, la secuencia de explotación y una combinación de ambas, sujetas a restricciones de capacidad de carguío, mezcla de mineral, movimiento de desmonte, capacidad mínima de producción y asignación de la producción.

La solución ha sido determinada en forma tal que pueda ser empleada en la programación de planes de producción por guardia. Se realizaron análisis post-óptimos de la solución, utilizando procedimientos de programación paramétrica.

De este modo la Administración cuenta no sólo con una técnica que le permite obtener una serie de alternativas de solución, sino que mediante la misma pueda realizar estudios de simulación, constituyéndose de este modo en una herramienta eficaz en la difícil tarea del planeamiento y la toma de decisiones.



## 7.2 CONCLUSIONES

Las operaciones mineras son llevadas a cabo en un ambiente altamente competitivo. El agotamiento de los depósitos mineralizados de alta ley, así como el incremento del costo de la mano de obra y equipo, así como los costos operacionales determinan que la rentabilidad en una operación minera sea una tarea difícil.

Las técnicas de Investigación Operativa tales como la programación lineal, pueden ser utilizadas en el diseño, planeamiento y operación de sistemas mineros complejos. En operaciones como aquellas analizadas en este estudio, la programación lineal juega un gran papel en la consecución de los objetivos trazados por la Empresa. Por ejemplo, los costos de explotación pueden ser considerados fijos o tener un valor promedio cuando se planea períodos cortos de tiempo, tal como en los planes operacionales. El planeamiento a largo plazo tiene como objetivo la conservación al mínimo de los costos. Por otro lado, la secuencia de explotación, es de gran importancia en las operaciones diarias. Basado en los resultados obtenidos en el presente estudio, podemos concluir que:

- a. Los modelos de programación lineal (P.L.) son bastante útiles en asistir a la Administración de la mina a programar científicamente sus operaciones mineras.
- b. La P.L. puede ser aplicada con éxito en el planeamiento de producción de una operación minera a cielo abierto,

ya sea maximizando las ganancias o minimizando los costos involucrados en la operación, tal como se muestra en los resultados obtenidos con el modelo.

- c. En general, se pueden analizar situaciones relacionadas a la operación y al aspecto económico de la misma tales como las que se enumeran a continuación:
- ¿ Cuánto se incrementaría la ganancia o beneficio, si la producción en un frente de explotación se aumenta en un determinado número de toneladas?
  - ¿ Cuáles son los rangos de variación de la producción en un frente de explotación, si el objetivo principal de la operación es maximizar la ganancia?
  - ¿Cuál es la unidad de producción en la que con un incremento de producción se obtiene la ganancia máxima?
- d. El análisis de sensibilidad es de gran importancia en la toma de decisiones a nivel gerencial. Mediante dicho análisis la solución obtenida con el modelo de P.L. puede ser implementada en la vida real en forma más práctica, vale decir, el análisis de sensibilidad da un rango, bajo el cual la solución definida con la P.L. es válida.

### 7.3 RECOMENDACIONES

En la solución del modelo de P.L. una serie de problemas deben ser considerados y estudiados cuidadosamente.

- a. Se recomienda la realización de un estudio económico de factibilidad antes de aplicarse el modelo. Los facto -

res principales a considerarse en dicho estudio son:

El costo adicional de muestreo y análisis cuantitativos que se necesitan para determinar los coeficientes necesarios del modelo (por ejemplo la ley de mineral).

El costo involucrado en la recolección y preparación del sistema de información del modelo.

El personal necesario para codificar la información del modelo.

El costo del sistema de computadoras y la disponibilidad económica de las mismas.

La ganancia adicional a obtenerse mediante la aplicación del modelo, en comparación con los gastos que la Empresa debe incurrir en aplicarlo.

- b. A fin de evitar planes o estrategias que puedan comprometer a las operaciones mineras, se deberá optimizar una función objetiva que combine el costo de transporte y la secuencia de explotación. En tal sentido, es necesario escalar los "coeficientes de deseabilidad", de tal modo que reflejen la importancia del problema de secuencia de explotación con relación al problema de costo de transporte.
- c. El modelo desarrollado puede ser ampliado y extrapolado para analizar situaciones más complejas. El modelo puede ser modificado con el fin de estimar programas de

producción más amplios, tales como programas semanales, mensuales o anuales, en lugar de programas de producción diarios o por guardias.

- d. El transporte de materiales, sistemas de almacenamiento, plantas de concentración y reducción metalúrgica de minerales de hierro, pueden ser incluidos en el modelo con el fin de fijar las estrategias generales de la Empresa. La adición de estos elementos al modelo básico, incrementarán las dimensiones del problema.
- e. Se debe desarrollar un sistema rápido y simple para actualizar o cambiar los coeficientes de la matriz del modelo de tal manera que una aplicación real del modelo sea práctica, de lo contrario, el período de planificación de la producción podría ser restringido por el proceso de actualización.

## BIBLIOGRAFIA

1. Anderson, A. M. "Operational Research in the Mineral Industry", Mining Magazine, April 1966.
2. Andrew, R., "The Applications of Operations Research to Some Technical and Management Problems," Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgical, Nº 226, 1963.
3. Copper, L. and Streinberg, D. "Methods and Applications of Linear Programming", W.B. Saunders Company Philadelphia, 1974.
4. Dantzig, G. B. "Linear Programming and Extensions", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963.
5. Driebeek, N. J., "Applied Linear Programming", Addison Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1969.
6. Faulkner, G., "Linear Programming Applied to a Mining-Smelting Operations", The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Noviembre 1967.
7. I.B.M., "Mathematical Programming System 1360 - Linear and Separable Programming-Users Manual", H20-0476-0, New York, 1967.
8. Janssen, A.T., "Long-Range Production Planning of Direct

Shipping Ore from Several Deposits," A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry, A.I.M.E., New York, 1969.

9. Johnson, T. B., "Optimum Open-Pit Mine Production Scheduling", Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1968.
10. Kim, Y.C., "Mathematical Programming Analysis of Mine Planning Problems", Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, 1967.
11. Manula, C.B., "An Optimal Programming Model for Mine Production Scheduling" Proceedings of the Fifth Annual Symposium on Computers Applications in Mining and Exploration, Vol. 1, College of Mines, University of Arizona, March 1965.
12. Munier, N.J., "Técnicas Modernas para el Planeamiento y Control de Producción", IPAE, 1976.
13. Parris, L., "An Application of Mathematical Programming and System Simulation to Bauxite Mining Operations in Jamaica", M. Eng. Report, Mineral Engineering Management, The Pennsylvania State University, 1973.
14. Ramani, R. V., "Mathematical Programming Applications in the Crushed Stone Industry", Ph. D. Thesis, the Pennsylvania State University, 1970.

APENDICE A

MODELO DE PLANEAMIENTO DE PRODUCCION  
DE UNA MINA A CIELO ABIERTO





# MODELO DE PLANEAMIENTO DE PRODUCCION DE UNA MINA A CIELO ABIERTO

VARIABLES FUNCIONES	X 11	X 12	X 13	X 14	X 15	X 16	X 17	Y 11	Y 12	Y 13	Y 14	Y 15	Y 16	Y 17	X 21	X 22	X 23	Y 21	Y 22	Y 23	RHS
COST SEQ	.04	.046	.052	.055	.047	.058	.06	.099	.119	.051	.043	.068	.064	.110	.01	.025	.041	.09	.05	.051	
MINCOST	.07	.066	.076	.055	.077	.068	.08	.209	.219	.181	.163	.198	.174	.221	.04	.045	.051	.20	.17	.181	
MINSEQ	.03	.02	.02		.03	.01	.02	.01		.03	.02	.03	.01	.01	.03	.02	.01	.01	.02	.03	
PRCASH 11	.0016							.0011													≤7.5
PRCASH 12		.0009							.0016												≤5.0
PRCASH 13			.0011							.0009											≤7.5
PRCASH 14				.0009							.0016										≤6.5
PRCASH 15					.0009							.0011									≤7.5
PRCASH 16						.0011							.0016								≤7.5
PRCASH 17							.0016							.0011							≤7.5
PRCASH 21	.0016	.0009	.0011	.0009	.0009	.0011	.0016	.0011	.0016	.0009	.0016	.0011	.0016	.0011							=37.5
PRCASH 22															.0016			.0011			≤7.5
PRCASH 23																.0011			.0011		≤7.5
PRCASH 23																	.0009			.0016	≤4.0
PRCASH 23															.0016	.0011	.0009	.0011	.0011	.0016	=15.0
TOLOACAP	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0								1.0	1.0	1.0				≤33000
DEMAND	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0								1.0	1.0	1.0				≥22500
WASTMIN 1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0							
WASTMIN 2															-1.0	-1.0	-1.0	8.0	8.0	8.0	
MINAL203	.016	-.002		-.006	.006	.003									.006	-.001	.001				≥0
MAXAL203	-.014	.004	.002	.008	-.004	-.001	.002								-.004	.003	.001				≥0
MINILOSS	.015	-.002	.004	-.014	.001	.009	-.02								.003	-.001	-.021				≥0
MAXILOSS	-.005	.012	.006	.024	.009	.001	.03								.007	.011	.031				≥0
MINNTFIN	-.34	-.34	.66	.66	-.34	-.14	.06								-.24	.08	.51				≥0
MAXNTFIN	.38	.38	-.62	-.62	.38	.18	-.02								.28	-.04	-.47				≥0
MAXPROM 1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0								4.0	4.0	4.0				
MINPROM 1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0								-.67	-.67	-.67				
MIN SI02	-.015	-.002	.012	.01		-.009	-.004								-.001	-.007	-.005				≥0
MAX SI02	.019	.006	-.008	-.006	.004	.013	.008								.005	.011	-.001				≥0

APENDICE B

PROGRAMA DE CONTROL MPSX  
LISTADO DE ENTRADA Y SALIDA

## CONTROL PROGRAM COMPILER - MPS/360 V2-M11

```
0001          PROGRAM
0002          INITIALZ
0065          MOVE(XPBNAM, 'PBFILE')
0066          MOVE(XDATA, 'PERU LP')
0067          CONVERT('SUMMARY')
0068          BCDCOUT
0069          SETUP
0070          PICTURE
0071          MOVE(XOBJ, 'COSTSEQ')
0072          MOVE(XPHS, 'RHS')
0073          PRIMAL
0074          RANGE
0075          SOLUTION
0076          SETUP
0077          PICTURE
0078          MOVE(XOBJ, 'MINCOST')
0079          PRIMAL
0080          RANGE
0081          SOLUTION
0082          SETUP('MAX')
0083          PICTURE
0084          MOVE(XOBJ, 'MINSEQ')
0085          PRIMAL
0086          RANGE
0087          SOLUTION
0088          EXIT
0089          PEND
```

PROGRAMA DE CONTROL DEL COMPILADOR

## EXECUTOR. MPS/360 V2-M11

NAME	PERO LP			
ROWS				
N	COSTSEQ			
N	MINCOST			
N	MINSEQ			
L	PRCASH11			
L	PRCASH12			
L	PRCASH13			
L	PRCASH14			
L	PRCASH15			
L	PRCASH16			
L	PRCASH17			
E	PRCASH18			
L	PRCASH21			
L	PRCASH22			
L	PRCASH23			
E	PRCASH24			
L	PRCASH25			
L	TOLOACAP			
G	DEMAND			
G	WASTMIN1			
G	WASTMIN2			
G	MINSIO2			
G	MAXSIO2			
G	MINAL203			
G	MAXAL203			
G	MINILOSS			
G	MAXILOSS			
G	MINNTPIN			
G	MAXNTPIN			
G	MAXPROM1			
G	MINPROM1			
COLUMNS				
X11	COSTSEQ	.04000	MINCOST	.07000
X11	MINSEQ	.03000	PRCASH11	.00160
X11	PRCASH11	.00160	TOLOACAP	1.00000
X11	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000
X11	MINSIO2	.01500	MAXSIO2	.01900
X11	MINAL203	.01600	MAXAL203	.01400
X11	MINILOSS	.01500	MAXILOSS	.00500
X11	MINNTPIN	.34000	MAXNTPIN	.38000
X11	MAXPROM1	1.00000	MINPROM1	1.00000
X12	COSTSEQ	.04600	MINCOST	.06600
X12	MINSEQ	.02000	PRCASH12	.00090
X12	PRCASH11	.00090	TOLOACAP	1.00000
X12	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000
X12	MINSIO2	.00200	MAXSIO2	.00600
X12	MINAL203	.00200	MAXAL203	.00400
X12	MINILOSS	.00200	MAXILOSS	.01200
X12	MINNTPIN	.34000	MAXNTPIN	.38000
X12	MAXPROM1	1.00000	MINPROM1	1.00000
X13	COSTSEQ	.05600	MINCOST	.07600
X13	MINSEQ	.02000	PRCASH13	.00110
X13	PRCASH11	.00110	TOLOACAP	1.00000
X13	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000

LISTADO DE ENTRADA DE LA INFORMACION.

EXECUTOR.		MPS/360 V2-M11		
X13	MINSIO2	.01200	MAXSIO2	.00800
X13	MAXAL203	.00200	MINILOSS	.00400
X13	MAXILOSS	.00600	MINNTPIN	.66000
X13	MAXNTPIN	.62000	MAXPROM1	1.00000
X13	MINPROM1	1.00000		
X14	COSTSEQ	.05500	MINCOST	.05500
X14	PRCASH14	.00090	PRCASH14	.00090
X14	TOLOACAP	1.00000	DEMAND	1.00000
X14	WASTMIN1	1.00000	MINSIO2	.01000
X14	MAXSIO2	.00600	MINAL203	.00600
X14	MAXAL203	.00800	MINILOSS	.01400
X14	MAXILOSS	.02400	MINNTPIN	.66000
X14	MAXNTPIN	.62000	MAXPROM1	1.00000
X14	MINPROM1	1.00000		
X15	COSTSEQ	.04700	MINCOST	.07700
X15	MINSEQ	.03000	PRCASH15	.00090
X15	PRCASH15	.00090	TOLCACAP	1.00000
X15	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000
X15	MAXSIO2	.00400	MINAL203	.00600
X15	MAXAL203	.00400	MINILOSS	.00100
X15	MAXILOSS	.00900	MINNTPIN	.34000
X15	MAXNTPIN	.38000	MAXPROM1	1.00000
X15	MINPROM1	1.00000		
X16	COSTSEQ	.05800	MINCOST	.06800
X16	MINSEQ	.01000	PRCASH16	.00110
X16	PRCASH16	.00110	TOLOACAP	1.00000
X16	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000
X16	MINSIO2	.00900	MAXSIO2	.01300
X16	MINAL203	.00300	MAXAL203	.00100
X16	MINILOSS	.00900	MAXILOSS	.00100
X16	MINNTPIN	.14000	MAXNTPIN	.18000
X16	MAXPROM1	1.00000	MINPROM1	1.00000
X17	COSTSEQ	.06000	MINCOST	.08000
X17	MINSEQ	.02000	PRCASH17	.00160
X17	PRCASH17	.00160	TOLOACAP	1.00000
X17	DEMAND	1.00000	WASTMIN1	1.00000
X17	MINSIO2	.00400	MAXSIO2	.00800
X17	MAXAL203	.00200	MINILOSS	.02000
X17	MAXILOSS	.03000	MINNTPIN	.06000
X17	MAXNTPIN	.02000	MAXPROM1	1.00000
X17	MINPROM1	1.00000		
Y11	COSTSEQ	.09900	MINCOST	.20900
Y11	MINSEQ	.01000	PRCASH11	.00110
Y11	PRCASH11	.00110	WASTMIN1	3.00000
Y12	COSTSEQ	.11900	MINCOST	.21900
Y12	PRCASH12	.00160	PRCASH11	.00160
Y12	WASTMIN1	3.00000		
Y13	COSTSEQ	.05100	MINCOST	.18100
Y13	MINSEQ	.03000	PRCASH13	.00090
Y13	PRCASH13	.00090	WASTMIN1	3.00000
Y14	COSTSEQ	.04300	MINCOST	.16300
Y14	MINSEQ	.02000	PRCASH14	.00160
Y14	PRCASH14	.00160	WASTMIN1	3.00000
Y15	COSTSEQ	.06800	MINCOST	.19800

LISTADO DE ENTRADA (Continuación).

## EXECUTOR. MPS/360 V2-H11

Y15	MINSEQ	.03000	PRCASH15	.00110
Y15	PRCAMIN1	.00110	WASTMIN1	3.00000
Y16	COSTSEQ	.06400	MINCOST	.17400
Y16	MINSEQ	.01000	PRCASH16	.00160
Y16	PRCAMIN1	.00160	WASTMIN1	3.00000
Y17	COSTSEQ	.11000	MINCOST	.22100
Y17	MINSEQ	.01000	PRCASH17	.00110
Y17	PRCAMIN1	.00110	WASTMIN1	3.00000
X21	COSTSEQ	.01000	MINCOST	.04000
X21	MINSEQ	.03000	PRCASH21	.00160
X21	PRCAMIN2	.00160	TOLCACAP	1.00000
X21	DEMAND	1.00000	WASTMIN2	- 1.00000
X21	MINSIO2	.00100	MAXSIO2	.00500
X21	MINAL203	.00600	MAXAL203	.00400
X21	MINILOSS	.00300	MAXILOSS	.00700
X21	MINNTPIN	.24000	MAXNTPIN	.28000
X21	MAXPROM1	4.00000	MINPROM1	- .67000
X22	COSTSEQ	.02500	MINCOST	.04500
X22	MINSEQ	.02000	PRCASH22	.00110
X22	PRCAMIN2	.00110	TOLCACAP	1.00000
X22	DEMAND	1.00000	WASTMIN2	- 1.00000
X22	MINSIO2	.00700	MAXSIO2	.01100
X22	MINAL203	.00100	MAXAL203	.00300
X22	MINILOSS	.00100	MAXILOSS	.01100
X22	MINNTPIN	.08000	MAXNTPIN	- .04000
X22	MAXPROM1	4.00000	MINPROM1	- .67000
X23	COSTSEQ	.04100	MINCOST	.05100
X23	MINSEQ	.01000	PRCASH23	.00090
X23	PRCAMIN2	.00090	TOLCACAP	1.00000
X23	DEMAND	1.00000	WASTMIN2	- 1.00000
X23	MINSIO2	.00500	MAXSIO2	- .00100
X23	MINAL203	.00100	MAXAL203	.00100
X23	MINILOSS	.02100	MAXILOSS	.03100
X23	MINNTPIN	.51000	MAXNTPIN	- .47000
X23	MAXPROM1	4.00000	MINPROM1	- .67000
Y21	COSTSEQ	.09000	MINCOST	.20000
Y21	MINSEQ	.01000	PRCASH21	.00110
Y21	PRCAMIN2	.00110	WASTMIN2	8.00000
Y22	COSTSEQ	.05000	MINCOST	.17000
Y22	MINSEQ	.02000	PRCASH22	.00110
Y22	PRCAMIN2	.00110	WASTMIN2	8.00000
Y23	COSTSEQ	.05100	MINCOST	.18100
Y23	MINSEQ	.03000	PRCASH23	.00160
Y23	PRCAMIN2	.00160	WASTMIN2	8.00000
RHS				
RHS	PRCASH11	7.50000	PRCASH12	5.00000
RHS	PRCASH13	7.50000	PRCASH14	6.50000
RHS	PRCASH15	7.50000	PRCASH16	7.50000
RHS	PRCASH17	7.50000	PRCAMIN1	37.50000
RHS	PRCASH21	7.50000	PRCASH22	7.50000
RHS	PRCASH23	4.00000	PRCAMIN2	15.00000
RHS	TOLCACAP	33300.00000	DEMAND	22500.00000
ENDATA				

LISTADO DE ENTRADA (Continuación).

SECTION 1 - ROWS

NUMBER	...ROW..	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..DUAL ACTIVITY
1	COSTSEQ	BS	1813.24457	1813.24457-	NONE	NONE	.
2	MINCOST	BS	3554.10307	3554.10307-	NONE	NONE	1.00000
3	MINSEQ	BS	859.25384	859.25384-	NONE	NONE	.
4	PRCASH11	BS	4.57360	2.92640	NONE	7.50000	.
5	PRCASH12	UL	5.00000	.	NONE	5.00000	80.50958
6	PRCASH13	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	88.00317
7	PRCASH14	UL	6.50000	.	NONE	6.50000	60.98946
8	PRCASH15	BS	3.04224	4.45776	NONE	7.50000	.
9	PRCASH16	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	54.11446
10	PRCASH17	BS	3.38416	4.11584	NONE	7.50000	.
11	PRCAHIN1	EQ	37.50000	.	37.50000	37.50000	125.16628-
12	PRCASH21	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	13.49947
13	PRCASH22	BS	5.55288	1.94712	NONE	7.50000	.
14	PRCASH23	BS	1.94712	2.05288	NONE	4.00000	.
15	PRCAHIN2	EQ	15.00000	.	15.00000	15.00000	55.09834-
16	TOLOCAP	BS	32532.87540	767.12460	NONE	33300.00000	.
17	DEMAND	BS	32532.87540	10032.87540-	22500.00000	NONE	.
18	WASTHIN1	LL	.	.	.	NONE	.02011-
19	WASTHIN2	LL	.	.	.	NONE	.01161-
20	MINLIO2	LL	.	.	.	NONE	4.06401-
21	HAYLIO2	BS	130.13150	130.13150-	.	NONE	.
22	MINAL203	BS	65.06575	65.06575-	.	NONE	.
23	HAYAL203	LL	.	.	.	NONE	10.64932-
24	MINILOSS	LL	.	.	.	NONE	5.20265-
25	HAYILOSS	BS	325.32875	325.32875-	.	NONE	.
26	HINRTPIN	BS	1301.31502	1301.31502-	.	NONE	.
27	HAYNTPIN	LL	.	.	.	NONE	.05750-
28	HAYPROB1	BS	16145.00921	16145.00921-	.	NONE	.
29	HINPROB1	BS	16274.46194	16274.46194-	.	NONE	.

SOLUCION OPTIMA EMPLEANDO "MINCOST" COMO FUNCION OBJETIVA.

## SECTION 2 - COLUMNS

NUMBER	.COLUMN.	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	.REDUCED COST.
30	X11	BS	2858.50257	.07000	.	NONE	.
31	X12	BS	5555.55556	.06600	.	NONE	.
32	X13	BS	6818.18182	.07600	.	NONE	.
33	X14	BS	2101.35814	.05500	.	NONE	.
34	X15	BS	3308.74791	.07700	.	NONE	.
35	X16	BS	39.85303	.06800	.	NONE	.
36	X17	BS	2115.09945	.08000	.	NONE	.
37	Y11	LL	.	.20900	.	NONE	.01100
38	Y12	LL	.	.21900	.	NONE	.08723
39	Y13	LL	.	.18100	.	NONE	.08724
40	Y14	BS	2880.48605	.16300	.	NONE	.
41	Y15	BS	58.51241	.19800	.	NONE	.
42	Y16	BS	4660.10104	.17400	.	NONE	.
43	Y17	LL	.	.22100	.	NONE	.02300
44	X21	BS	4687.50000	.04000	.	NONE	.
45	X22	BS	5048.07692	.04500	.	NONE	.
46	X23	LL	.	.05100	.	NONE	.11833
47	Y21	LL	.	.20000	.	NONE	.06140
48	Y22	LL	.	.17000	.	NONE	.01655
49	Y23	BS	1216.94712	.18100	.	NONE	.

"MINCOST" (Continuación).



SECTION 1 - ROWS

NUMBER	...ROW..	MT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..DUAL ACTIVITY
1	COSTSEQ	BS	2549.16489	2549.16489-	NONE	NONE	.
2	MINCOST	BS	5929.22108	5929.22108-	NONE	NONE	.
3	MINSEQ	BS	996.84818	996.84818-	NONE	NONE	1.00000
4	PRCASH11	BS	4.81224	2.68776	NONE	7.50000	.
5	PRCASH12	UL	5.00000	.	NONE	5.00000	8.77964-
6	PRCASH13	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	24.24242-
7	PRCASH14	UL	6.50000	.	NONE	6.50000	3.40909-
8	PRCASH15	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	18.18182-
9	PRCASH16	BS	.	7.50000	NONE	7.50000	.
10	PRCASH17	BS	6.18776	1.31224	NONE	7.50000	.
11	PRCANIN1	EQ	37.50000	.	37.50000	37.50000	9.09091-
12	PRCASH21	BS	4.28082	3.21918	NONE	7.50000	.
13	PRCASH22	BS	6.71918	.78082	NONE	7.50000	.
14	PRCASH23	UL	4.00000	.	NONE	4.00000	.56818-
15	PRCANIN2	EQ	15.00000	.	15.00000	15.00000	18.18182-
16	TOLOACAP	BS	22500.00000	10900.00000	NONE	33300.00000	.
17	DEMAND	LL	22500.00000	.	22500.00000	NONE	.00015
18	WASTIN1	BS	32975.91177	32975.91177-	.	NONE	.
19	WASTIN2	BS	49770.85712	49770.85712-	.	NONE	.
20	MINIO2	LL	.	.	.	NONE	.69302
21	MAXIO2	BS	90.00000	90.00000-	.	NONE	.
22	MINAL203	BS	45.00000	45.00000-	.	NONE	.
23	MAXAL203	LL	.	.	.	NONE	.51369
24	MINILOSS	LL	.	.	.	NONE	.39515
25	MAXILOSS	BS	225.00000	225.00000-	.	NONE	.
26	MINTPIN	LL	.	.	.	NONE	.00954
27	MAXTPIN	BS	900.00000	900.00000-	.	NONE	.
28	MAXPROM1	LL	.	.	.	NONE	.00070
29	MINPROM1	BS	14985.00000	14985.00000-	.	NONE	.

SOLUCION OPTIMA EMPLEANDO "MINSEQ" COMO FUNCION OBJETIVA.

## SECTION 2 - COLUMNS

NUMBER	COLUMN.	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..REDUCED COST.
30	X11	BS	3007.64873	.03000	.	NONE	.
31	X12	BS	5555.55556	.02000	.	NONE	.
32	X13	BS	2755.55532	.02000	.	NONE	.
33	X14	BS	3860.60925	.	.	NONE	.
34	X15	BS	2820.63114	.03000	.	NONE	.
35	X16	LL	.	.01000	.	NONE	.00509-
36	X17	LL	.	.02000	.	NONE	.00417-
A 37	Y11	LL	.	.01000	.	NONE	.
38	Y12	LL	.	.	.	NONE	.02859-
39	Y13	BS	4965.43238	.03000	.	NONE	.
40	Y14	BS	1890.90730	.02000	.	NONE	.
41	Y15	BS	4510.39271	.03000	.	NONE	.
42	Y16	LL	.	.01000	.	NONE	.00455-
43	Y17	BS	5625.23820	.01000	.	NONE	.
44	X21	BS	2675.51429	.03000	.	NONE	.
45	I22	BS	1824.48571	.02000	.	NONE	.
46	I23	LL	.	.01000	.	NONE	.00339-
47	Y21	LL	.	.01000	.	NONE	.01000-
48	Y22	BS	4283.85714	.02000	.	NONE	.
49	Y23	BS	2500.00000	.03000	.	NONE	.

"MINSEQ" (Continuación).

SECTION 1 - ROWS

NUMBER	...ROW..	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..DUAL ACTIVITY
1	COSTSEQ	BS	1798.76484	1798.76484-	NONE	NONE	1.00000
2	MINCOST	BS	3981.68020	3981.68020-	NONE	NONE	.
3	MINSEQ	BS	859.46000	859.46000-	NONE	NONE	.
4	PRCASH11	BS	3.39493	4.10507	NONE	7.50000	.
5	PRCASH12	UL	5.00000	.	NONE	5.00000	11.61601
6	PRCASH13	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	55.33015
7	PRCASH14	UL	6.50000	.	NONE	6.50000	34.94318
8	PRCASH15	BS	2.83732	4.66268	NONE	7.50000	.
9	PRCASH16	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	21.81818
10	PRCASH17	BS	4.76774	2.73226	NONE	7.50000	.
11	PRCAMIN1	EQ	37.50000	.	37.50000	37.50000	51.81818-
12	PRCASH21	UL	7.50000	.	NONE	7.50000	25.42964
13	PRCASH22	BS	3.50000	4.00000	NONE	7.50000	.
14	PRCASH23	UL	4.00000	.	NONE	4.00000	5.18214
15	PRCAMIN2	EQ	15.00000	.	15.00000	15.00000	37.05714-
16	TOLOACAP	BS	26071.74496	7228.25504	NONE	33300.00000	.
17	DEMAND	BS	26071.74496	3571.74496-	22500.00000	NONE	.
18	WASTIN1	BS	14001.23414	14001.23414-	.	NONE	.
19	WASTIN2	BS	12130.68182	12130.68182-	.	NONE	.
20	MINSIO2	LL	.	.	.	NONE	3.12085-
21	MAXSIO2	BS	104.28698	104.28698-	.	NONE	.
22	MINAL203	BS	52.14349	52.14349-	.	NONE	.
23	MAXAL203	LL	.	.	.	NONE	2.55324-
24	MINILOSS	LL	.	.	.	NONE	1.57661-
25	MAXILOSS	BS	260.71745	260.71745-	.	NONE	.
26	MINNTPIN	BS	950.83815	950.83815-	.	NONE	.
27	MAXNTPIN	BS	92.03165	92.03165-	.	NONE	.
28	MAXPROH1	BS	13274.84595	13274.84595-	.	NONE	.
29	MINPROH1	BS	12929.98360	12929.98360-	.	NONE	.

SOLUCION OPTIMA UTILIZANDO UNA COMBINACION DE "MINCOST" Y "MINSEQ" COMO FUNCION OBJETIVA.

SECTION 2 - COLUMNS

NUMBER	COLUMN	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT.	..UPPER LIMIT.	..REDUCED COST.
30	X11	BS	2121.83224	.04000	.	NONE	.
31	X12	BS	5555.55556	.04600	.	NONE	.
32	X13	BS	6818.18182	.05600	.	NONE	.
33	X14	LL	.	.05500	.	NONE	.00125
34	X15	BS	727.01722	.04700	.	NONE	.
35	X16	LL	.	.05800	.	NONE	.03045
36	X17	BS	2979.83994	.06000	.	NONE	.
37	Y11	LL	.	.09900	.	NONE	.03100
38	Y12	LL	.	.11900	.	NONE	.03868
39	Y13	LL	.	.05100	.	NONE	.04516
40	Y14	BS	4062.50000	.04300	.	NONE	.
41	Y15	BS	1984.55364	.06800	.	NONE	.
42	Y16	BS	4687.50000	.06400	.	NONE	.
43	Y17	LL	.	.11000	.	NONE	.04200
44	X21	BS	4687.50000	.01000	.	NONE	.
45	X22	BS	3181.81818	.02500	.	NONE	.
46	X23	LL	.	.04100	.	NONE	.02726
47	Y21	LL	.	.09000	.	NONE	.07721
48	Y22	LL	.	.05000	.	NONE	.00924
49	Y23	BS	2500.00000	.05100	.	NONE	.

COMBINACION DE "MINCOST" Y "MINSEQ" (Continuación).

APENDICE C

ANALISIS POST OPTIMO, PROGRAMAS DE CONTROL  
LISTADO DE ENTRADA Y SALIDA

## CONTROL PROGRAM COMPILER - MPS/360 V2-M11

```
0001          PROGRAM
0002          INITIALZ
0065          MOVE(XPBNAM, 'PBFILE')
0066          MOVE(XDATA, 'PERU LP')
0067          CONVERT('SUMMARY')
0068          BCDOU
0069          SETUP
0070          PICTURE
0071          MOVE(XOBJ, 'COSTSEQ')
0072          MOVE(XRHS, 'RHS')
0073          PRIMAL
0074          RANGE
0075          SOLUTION
0076          SETUP
0077          PICTURE
0078          MOVE(XOBJ, 'MINCGST')
0079          PRIMAL
0080          RANGE
0081          SOLUTION
0082          MOVE(XCHCOL, 'CHANPRCA')
0083          XPARAM=3.0
0084          XPARAM=0.0
0085          XPARDEL=0.1
0086          PARARHS
0087          SETUP('MAX')
0088          PICTURE
0089          MOVE(XOBJ, 'MINSEQ')
0090          PRIMAL
0091          RANGE
0092          SOLUTION
0093          EXIT
0094          PEND
```

PROGRAMA DE CONTROL PARA PROGRAMACION  
PARAMETRICA DE LOS TERMINOS INDEPENDIENTES  
EMPLEANDO "MINCOST" COMO FUNCION OBJETIVA.

## CONTROL PROGRAM COMPILER - MPS/360 V2-M11

```

0001          PROGRAM
0002          INITIALZ
0065          MOVE(XPBNAM, 'PBFILE')
0066          MOVE(XDATA, 'PERU LP')
0067          CCNVERT('SUMMARY')
0068          BCDOU
0069          SETUP
0070          PICTURE
0071          MOVE(XOBJ, 'CCSTSEQ')
0072          MOVE(XRHS, 'RHS')
0073          PRIMAL
0074          RANGE
0075          SCLUTION
0076          SETUP
0077          PICTURE
0078          MOVE(XOBJ, 'MINCOST')
0079          PRIMAL
0080          RANGE
0081          SOLUTION
0082          MOVE(XCROW, 'NEWCOST')
0083          XPARAM=1.5
0084          XPARAM=0.0
0085          XPARDEL=.1
0086          PARAOBJ
0087          SETUP('MAX')
0088          PICTURE
0089          MOVE(XOBJ, 'MINSEQ')
0090          PRIMAL
0091          RANGE
0092          SOLUTION
0093          EXIT
0094          PEND

```

PROGRAMA DE CONTROL PARA PROGRAMACION  
PARAMETRICA DE LA FUNCION OBJETIVA  
EMPLEANDO "MINCOST" COMO FUNCION OBJETIVA.

SECTION 1 - ROWS AT LIMIT LEVEL

NUMBER	...ROW..	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT. ..UPPER LIMIT.	LOWER ACTIVITY UPPER ACTIVITY	...UNIT COST.. ...UNIT COST..	..UPPER COST.. ..LOWER COST..	LIMITING PROCESS.	AT AT
5	PRCASH12	UL	5.00000	.	NONE 5.00000	2.92222 5.03364	80.50958 80.50958-		TOLOACAP X16	UL LL
6	PRCASH13	UL	7.50000	.	NONE 7.50000	6.36116 7.55426	88.00316 88.00316-		TOLCACAP Y15	UL LL
7	PRCASH14	UL	6.50000	.	NONE 6.50000	3.68099 6.57129	60.98946 60.98946-		TOLOACAP Y15	UL LL
9	PRCASH16	UL	7.50000	.	NONE 7.50000	4.68099 7.57129	54.11446 54.11446-		TOLCACAP Y15	UL LL
11	PRCAMIN1	EQ	37.50000	.	37.50000 37.50000	37.40661 38.38094	125.16628- 125.16628		Y15 TOLOACAP	LL UL
12	PRCASH21	UL	7.50000	.	NONE 7.50000	7.44251 11.72454	13.49947 13.49947-		X16 X15	LL LL
15	PRCAMIN2	EQ	15.00000	.	15.00000 15.00000	9.64410 15.09210	55.09833- 55.09833		MAXPROM1 X16	LL LL
18	WASTMIN1	LL	.	.	.	564.79395- 440.42749	.02011- .02011		Y15 X16	LL LL
19	WASTMIN2	LL	.	.	.	410.49097- 12130.67578	.01161- .01161		X16 PRCASH23	LL UL
20	MINSIQ2	LL	.	.	.	12.59139- 1.00840	4.06401- 4.06401		Y15 X16	LL LL
23	MAXAL203	LL	.	.	.	.28362- 12.23646	10.64932- 10.64932		X16 TOLCACAP	LL UL
24	MINILOSS	LL	.	.	.	.87231- 21.76067	5.20265- 5.20265		X16 TOLOACAP	LL UL
27	MAXTPIIN	LL	.	.	.	74.31200- 391.55298	.05750- .05750		X16 Y15	LL LL

LISTADO DE SALIDA DE FILAS AL NIVEL LIMITE.



SECTION 2 - COLUMNS AT LIMIT LEVEL

NUMBER	.COLUMN.	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT. ..UPPER LIMIT.	LOWER ACTIVITY UPPER ACTIVITY	...UNIT COST.. ...UNIT COST..	..UPPER COST.. ..LOWER COST..	LIMITING PROCESS.	AT AT
37	Y11	LL	.	.20900	. NONE	4052.51196- 58.51241	.01100- .01100	INFINITY .19800	PRCASH15 Y15	UL LL
38	Y12	LL	.	.21900	. NONE	22.49123- 2277.66870	.08723- .08723	INFINITY .13177	X16 X11	LL LL
39	Y13	LL	.	.18100	. NONE	610.74487- 982.98438	.08724- .08724	INFINITY .09376	Y15 TOLCACAP	LL UL
43	Y17	LL	.	.22100	. NONE	4052.51196- 58.51241	.02300- .02300	INFINITY .19800	PRCASH15 Y15	UL LL
46	Y23	LL	.	.05100	. NONE	22.10939- 1032.27539	.11833- .11833	INFINITY .06733-	X16 TOLCACAP	LL UL
47	Y21	LL	.	.20000	. NONE	1396.33740- 39.64592	.06140- .06140	INFINITY .13860	PRCASH23 X16	UL LL
48	Y22	LL	.	.17000	. NONE	1347.85327- 164.19641	.01655- .01655	INFINITY .15345	PRCASH23 X16	UL LL

LISTADO DE SALIDA DE COLUMNAS AL NIVEL LIMITE.

SECTION 3 - ROWS AT INTERMEDIATE LEVEL

NUMBER	...ROW..	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	..LOWER LIMIT. ..UPPER LIMIT.	LOWER ACTIVITY UPPER ACTIVITY	...UNIT COST.. ...UNIT COST..	..UPPER COST.. ..LOWER COST..	LIMITING PROCESS.	AT AT
4	PRCASH11	BS	4.57360	2.92640	NONE 7.50000	3.87150 4.63797	32.06802 10.00000		MAXNTPIN Y11	LL LL
8	PRCASH15	BS	3.04224	4.45776	NONE 7.50000	2.97787 3.58488	10.00000 41.49158		Y11 MAXNTPIN	LL LL
10	PRCASH17	BS	3.38416	4.11584	NONE 7.50000	3.35491 3.44852	26.53033 20.90909		PRCASH21 Y17	UL LL
13	PRCASH22	BS	5.55289	1.94711	NONE 7.50000	3.50000 5.80297	68.57695 10.86561		WASTMIN2 Y22	LL LL
14	PRCASH23	BS	1.94712	2.05288	NONE 4.00000	1.69703 6.47903	10.86561 68.57695		Y22 WASTMIN2	LL LL
16	TOLO&CAP	BS	32532.87549	767.12451	NONE 33300.00000	32392.24979 32601.15834	.06297 .03979		WASTMIN1 Y22	LL LL
17	DEMAND	BS	32532.87500	10032.87500-	22500.00000 NONE	32392.24930 32601.15795	.06297 .03979		WASTMIN1 Y22	LL LL
21	MAXSIO2	BS	130.13150	130.13150-	. NONE	129.25115 130.40463	4.65513 9.94874		MINSIO2 Y22	LL LL
22	MINAL203	BS	65.06575	65.06575-	. NONE	54.36354 65.20232	12.17599 19.89748		MAXAL203 Y22	LL LL
25	MAXLOSS	BS	325.32861	325.32861-	. NONE	323.92236 326.01144	6.29693 3.97950		WASTMIN1 Y22	LL LL
26	MINNTPIN	BS	1301.31494	1301.31494-	. NONE	914.39893 1304.04626	.05819 .99487		MAXNTPIN Y22	LL LL
28	MAXPRON1	BS	16145.00781	16145.00781-	. NONE	8831.58984 16392.48718	.01925 .01098		WASTMIN2 Y22	LL LL
29	MINPRON1	BS	16274.46094	16274.46094-	. NONE	16133.83524 17041.58521	.06297 .11178		WASTMIN1 Y13	LL LL

LISTADO DE SALIDA DE FILAS AL NIVEL INTERMEDIO.

SECTION 4 - COLUMNS AT INTERMEDIATE LEVEL

NUMBER	.COLUMN.	AT	...ACTIVITY...	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT. ..UPPER LIMIT.	LOWER ACTIVITY UPPER ACTIVITY	...UNIT COST.. ...UNIT COST..	..UPPER COST.. ..LOWER COST..	LIMITING PROCESS.	AT AT
30	X11	BS	2858.50244	.07000	. NONE	2419.68945 2868.79212	.05131 .07543	.12131 .00543-	MAINTPIN PRCASH21	LL UL
31	X12	BS	5555.55469	.06600	. NONE	1506.36621 5555.55469	.04907 INFINITY	.11507 INFINITY-	Y12 NONE	LL
32	X13	BS	6818.17969	.07600	. NONE	5782.87451 6818.17969	.09680 INFINITY	.17280 INFINITY-	PRCASH13 NONE	UL
33	X14	BS	2101.35791	.05500	. NONE	1671.99194 3805.93359	.05244 .05880	.10744 .00380-	MAXNTPIN PRCASH13	LL UL
34	X15	BS	3308.74780	.07700	. NONE	2135.75977 3353.77690	.12002 .01724	.19702 .05976	WASTMIN2 PRCASH21	LL UL
35	X16	BS	39.85303	.06800	. NONE	52.62970- 4075.73486	.01947 .04923	.08747 .01877	PRCASH21 Y12	UL LL
36	X17	BS	2115.09937	.08000	. NONE	2096.81570 3105.79663	.04245 .20055	.12245 .12055-	PRCASH21 Y12	UL LL
40	Y14	BS	2880.48584	.16300	. NONE	971.82520 3122.00430	.09008 .09322	.25308 .06978	PRCASH14 MAINTPIN	UL LL
41	Y15	BS	58.51241	.19800	. NONE	2601.84673- 2372.34492	.01100 .06593	.20900 .13207	Y11 PRCASH16	LL UL
42	Y16	BS	4660.09766	.17400	. NONE	1885.42944 4687.49661	.07161 .02833	.24561 .14567	Y12 PRCASH21	LL UL
44	X21	BS	4687.50000	.04000	. NONE	4651.56734 4687.50000	.02160 INFINITY	.06160 INFINITY-	PRCASH21 NONE	UL
45	X22	BS	5048.07422	.04500	. NONE	3181.81665 5097.82713	.07543 .01560	.12043 .02940	WASTMIN2 PRCASH21	LL UL
49	Y23	BS	1216.94702	.18100	. NONE	1060.64468 2499.99902	.01738 .10972	.19838 .07128	Y22 WASTMIN2	LL LL

## EXECUTOR. HPS/360 V2-M11

## SUMMARY OF MATRIX

SYMBOL	RANGE		COUNT (INCL. RHS)
Z	LESS THAN	.000001	
Y	.000001 THRU	.000009	
X	.000010	.000099	
W	.000100	.000999	10
V	.001000	.009999	78
U	.010000	.099999	59
T	.100000	.999999	31
1	1.000000	1.000000	44
A	1.000001	10.000000	23
B	10.000001	100.000000	2
C	100.000001	1,000.000000	
D	1,000.000001	10,000.000000	
E	10,000.000001	100,000.000000	2
F	100,000.000001	1,000,000.000000	
G	GREATER THAN	1,000,000.000000	

SUMARIO DE LA MATRIZ DEL MODELO.