



# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“OPTIMIZACIÓN DEL BLENDING DE MINERALES EN EL PAD DE LIXIVIACIÓN DE LA MINA LAGUNAS NORTE USANDO PARÁMETROS DE LEY Y RECUPERACIÓN APLICANDO LINGO (LINEAR GENERAL OPTIMIZER SOFTWARE).

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

**Autores:**

Bach. Guillermo Ricardo Izquierdo Rojas

Bach. Víctor Ángel Rojas Fuentes

**Asesor:**

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León

Cajamarca – Perú

2016

## APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los Bachilleres Guillermo Ricardo Izquierdo Rojas y Víctor Ángel Rojas Fuentes, denominada:

**“OPTIMIZACIÓN DEL BLENDING DE MINERALES EN EL PAD DE LIXIVIACIÓN DE LA MINA LAGUNAS NORTE USANDO PARÁMETROS DE LEY Y RECUPERACIÓN USANDO LINGO (LINEAR GENERAL OPTIMIZER SOFTWARE).**

---

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León  
**ASESOR**

---

Ing. José Alfredo Siveroni Morales  
**JURADO**  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Roberto Severino Gonzáles Yana  
**JURADO**

---

Ing. Wilder Chuquiruna Chávez  
**JURADO**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
<b>APROBACIÓN DE LA TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1 Realidad Problemática.....	13
1.2 Formulación del Problema.....	14
1.3 Justificación.....	14
1.4 Limitaciones.....	15
1.5 Objetivos.....	15
1.5.1 <i>Objetivo General</i> .....	15
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	15
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 Bases Teóricas.....	18
2.2.1 Historia de la Programación Lineal.....	18
2.2.2 Programación Lineal.....	21
2.2.2.1 Definición.....	21
2.2.2.2 Ecuaciones Lineales.....	25
2.2.2.3 Las variables de Decisión.....	25
2.2.2.4 La función Objetivo.....	26
2.2.2.5 Restricciones.....	27
2.2.2.6 Restricciones de no-negatividad.....	28

2.2.3	Formulación de un modelo de Programación Lineal.....	30
2.2.4	Problema General de Programación Lineal.....	31
2.2.5	Interpretación económica del problema de Programación Lineal.....	32
2.2.6	Descripción de LINGO.....	33
2.2.6.1	LINGO.....	33
2.2.6.2	Fácil Expresión del modelo.....	33
2.2.6.3	Opciones de datos convenientes.....	33
2.2.6.4	Solucionadores de gran alcance.....	33
2.2.6.5	Modelo de manera interactiva.....	34
2.2.6.6	Extensa documentación y ayuda.....	34
2.3	Definición de términos básicos.....	37
<b>CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS.....</b>		<b>40</b>
3.1	Formulación de la Hipótesis.....	40
3.2	Operacionalización de variables.....	40
3.2.1	Variable dependiente.....	40
3.2.2	Variables independientes.....	40
<b>CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>		<b>42</b>
4.1	Tipo de diseño de investigación.....	42
4.2	Material.....	42
4.2.1	Unidad de estudio.....	42
4.2.2	Población.....	42
4.2.3	Muestra.....	42
4.2.4	Técnicas de recolección y análisis de datos.....	42
4.2.4.1	Instrumentos.....	42
4.2.4.2	Procedimientos.....	43
<b>CAPÍTULO 5. DESARROLLO.....</b>		<b>44</b>
5.1	Descripción de la Propiedad y Ubicación.....	44
5.2	Concesiones.....	44
5.3	Infraestructura .....	45

5.4	Fisiografía.....	45
5.5	Geología.....	46
5.5.1	Geología Regional.....	46
5.5.2	Geología Local y Mineralización.....	46
5.6	Clasificación del mineral.....	46
5.6.1	Mineral Carbonoso.....	46
5.6.2	Cobre y sulfuros.....	47
5.6.3	Minerales.....	48
5.7	Sistema de Clasificación del Material.....	48
5.7.1	Generación de polígonos.....	49
5.8	Clasificación de Materiales para polígonos y estacas de campo .....	49
5.8.1	Mineral.....	50
5.9	Método de Minado.....	55
5.10	Procesamiento de mineral.....	55
5.11	Optimización.....	58
5.11.1	Formulación del Modelo Matemático.....	60
5.11.2	Restricciones de ley de la mezcla.....	60
5.11.3	Restricciones de capacidad de procesamiento.....	61
5.11.4	Restricciones de capacidad de equipo minero.....	61
5.11.5	Restricciones de no-negatividad.....	62
5.12	Aplicación.....	64
5.12.1	Restricciones de ley de la mezcla.....	66
5.12.2	Restricciones de capacidad de procesamiento.....	66
5.12.3	Restricciones de capacidad de equipo minero.....	67
5.12.4	Restricciones de no-negatividad.....	68
5.12.5	Asignación de variables.....	68
5.12.6	Modelamiento y Codificación en LINGO.....	68
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....</b>		<b>72</b>
6.1	Reporte de Solución generada por LINGO.....	72
6.2	Interpretación de la Solución.....	74

6.2.1	Global Optimal Solution found.....	74
6.2.2	Infeasibilities.....	74
6.2.3	Total Solver Iterations.....	74
6.2.4	Elapsed Runtime Seconds.....	74
6.2.5	Model Class.....	74
6.2.6	Total Variables.....	75
6.2.7	Nonlinear variables, Integer variables.....	75
6.2.8	Total Constraints.....	75
6.2.9	Nonlinear constraints.....	75
6.2.10	Total nonzeros, Nonlinear nonzeros.....	75
6.2.11	Variable:Value.....	75
6.2.12	Variable:Reduced Cost.....	75
6.2.13	Slack or Surplus.....	76
6.2.14	Dual Price.....	76
<b>CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN.....</b>		<b>77</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>79</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>80</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>81</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>85</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla Nº 1 . Operacionalización de Variable dependiente.....	40
Tabla Nº 2 . Operacionalización de Variables Independientes.....	41
Tabla Nº 3 . Mining Concessions Lagunas Norte.....	44
Tabla Nº 4. TCM vs Gold Recovery.....	47
Tabla Nº 5 . Material Classification.....	53
Tabla Nº 6 . Ore Type Classification.....	54
Tabla Nº 7 . Inventario de stockpiles y Bancos Lagunas Norte... ..	64
Tabla Nº 8 .Cálculo de los Algoritmos de Recuperación.....	65
Tabla Nº 9 .Análisis comparativo de variables en mezcla.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura N° 1. Áreas de Aplicación de la Investigación de Operaciones.....	20
Figura N° 2. Interfaces LINGO.....	36
Figura N° 3 Clasificación de Materiales.....	49
Figura N° 4 Mineral M1-M1A.....	50
Figura N° 5 Mineral M2-M2A.....	50
Figura N° 6 Mineral M2B.....	51
Figura N° 7 Mineral M3.....	51
Figura N° 8 Mineral M3A.....	52
Figura N° 9 Mineral M3B.....	52
Figura N° 10 Parámetros de stockpile y bancos.....	59
Figura N° 11 Diagrama INPUT-OUTPUT del Proceso.....	63



## RESUMEN

El blending de mineral en el *pad* es un proceso importante y crítico que la mayoría de empresas mineras tiene que afrontar, para tal fin se revisan continuamente los planes de producción haciéndose las correcciones y ajustes necesarios, además para un efectivo control y administración el balance de la calidad y estabilidad de la mezcla debe llevarse a cabo de forma técnica y con ayuda de la mejor tecnología disponible.

La aplicación LINGO® (*Linear General Optimizer Software*) se basa en el modelo matemático de programación lineal llamado SIMPLEX y será utilizado como herramienta para resolver los problemas de optimización de mezcla de minerales. Los objetivos de esta tesis consisten en la aplicación de técnicas de programación lineal mediante LINGO® con el fin de asegurar una óptima mezcla de mineral y la selección de las áreas a excavar o pila de mineral a ser mezclados para cumplir con las restricciones de ley y recuperación.

Nuestra hipótesis de optimizar el proceso del blending de mineral en el pad de lixiviación de la Mina Lagunas Norte aplicando el software LINGO® se ha confirmado por los resultados obtenidos y las conclusiones más importantes son:

Se logró maximizar el número de Onzas de Oro puestas en el pad de lixiviación de la Mina Lagunas Norte con un adicional del orden de 1998.289 Oz lo cual constituye un incremento de 2.547% en la producción mensual con un valor económico de \$2'629,848.24.

Se permitió seleccionar con la ayuda del software las áreas o pilas de mineral a ser mezcladas cumpliendo con las restricciones de ley ( $\geq 0.4$  g/t) y recuperación metalúrgica.

Se verificó el uso del software LINGO v. 15.0 como una herramienta tecnológica y útil a la hora de modelar y optimizar procesos de blending de minerales. LINGO es una herramienta poderosa y de fácil manejo que es capaz de resolver eficientemente los problemas de mezcla presentados en esta tesis; el campo de aplicación directa consiste en la planificación de excavación de minas, control de calidad y mezcla de materia prima en la industria siderúrgica.

**PALABRAS CLAVE:** Mezcla de mineral, Modelo Matemático, Programación Lineal, LINGO, Optimización,

## ABSTRACT

The blending of ore on the pad is an important and critical process that most mining companies have to face, for this purpose they are continuously revised production plans making the necessary corrections and adjustments, in addition to effective management and control balance the quality and stability of the mixture should be carried out in a technical way and using the best available technology.

LINGO ® (General Linear Optimizer Software) application is based on the mathematical model of linear programming called SIMPLEX and will be used as a tool for solving optimization problems mix of minerals. The objectives of this thesis consist of the application of linear programming techniques by LINGO ® in order to ensure an optimal mix of mineral and selection of areas to dig or pile of ore to be blended to meet grade restrictions and recovery.

Our hypothesis of optimizing the blending process ore in the leach pad of Lagunas Norte Mine applying the software LINGO® has been confirmed by the results and the key findings are:

It managed to maximize the number of ounces of gold placed on the leach pad of Lagunas Norte Mine with an additional of about 1998.289 Oz which is an increase of 2,547% in monthly production with an economic value of \$ 2'629,848.24.

It is possible to select with the help of software areas or piles of ore to be mixed in compliance with grade restrictions ( $> = 0.4 \text{ g / t}$ ) and metallurgical recovery.

It was verified the use of LINGO software as a technology tool, useful for modeling and optimizing ore blending processes. LINGO is a powerful and easy to use tool that is able to efficiently solve the blending problems presented in this thesis; the field of direct application involves planning mine excavation, quality control and blendind of raw materials in the steel industry.

**KEYWORDS:** Ore blending, Mathematical Model, Linear Programming, LINGO, Optimization.

## **NOTA DE ACCESO**

**No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales**

## REFERENCIAS

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

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

Arellano G. (2016) *Introducción a LINGO*.

Barrick Gold Corporation (2015) *Annual Information Form*

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

Dantzig and Thapa (1997) *Linear Programming*, Springer-Verlag New York.

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

Deloitte (2015) *Tendencias de 2015, los 10 principales desafíos que enfrentarán las compañías mineras el próximo año*. [En línea], recuperado el 18 de Setiembre del 2016, de <http://www.deloitte.com/mining>

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

Freites, José Gregorio (1997). *Optimización de los planes de pilas a través de Microsoft Excel Solver*. Boletín Geominas.

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

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

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

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

Hooman Askari Nasab (2011) "*Mixed Integer Linear Programming formulations for open pit production scheduling*", Journal of Mining Science, Canada.

INFOMINE (2016), *Dictionary of Mining and Mineral Terms*, [En línea], recuperado el 30 de Agosto del 2016, de <http://www.infomine.com/dictionary/>

Jerez, Featherstone, Scheepers, (2003) *Strategic Planning Models using mathematical programming techniques. Presentation in "Copper 2003 Conference, Santiago, Chile"*.

Lindo Systems (2016), *Lingo Features*, [En línea], recuperado el 16 de Setiembre del 2016, de <http://www.lindo.com>

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

Pinto R., Merschmann, Campos. (2001) *Planejamento operacional de lavra de mina usando modelos matemáticos. Rem: Rev. Esc. Minas, July/Sept. 2001, vol. 54, no. 3, p.211-214.*

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

Ruiz, J.J (2014), *Introducción a la Programación Matemática, Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas y de Control, Universidad Complutense de Madrid.*

Schrage L. (2016) *Optimization Modeling with LINGO.*

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (2013), *Descripción de Procesos Mineros*, [En línea], recuperado el 21 de Agosto del 2016, de <http://www.snmpe.org.pe>

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

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

US Bureau of Mines (2016), *National Minerals Information Center*, [En línea], recuperado el 21 de Agosto del 2016, de <http://minerals.usgs.gov/minerals/>

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