

APÉNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

A continuación, se muestran las figuras y tablas referenciadas en el documento de investigación “Optimización Minera de las leyes de corte basado en el Gradiente Reducido Generalizado”, las cuales sirven de apoyo, guía y comprensión para el texto.

Apéndice de Tablas

Tabla A1: Simbología de cada variable técnica y económica empleada a lo largo de la investigación.

Simbología	Definición	Unidad
Qm	Material minado	Toneladas
Qc	Mineral procesado	Toneladas
Qr	Metal Producido	Toneladas
M	Capacidad de la mina	Ton/año
C	Capacidad de planta procesadora	Ton/año
R	Capacidad de la Refinería	Ton/año
m	Costo Mina	Usd/ton de material
c	Costo planta	Usd/ton de mineral
r	Costo Refinería	Usd/ton de metal fino
f	Costos fijos	Usd/año
T	Años de producción	Años
y	Recuperación de la concentradora	Porcentaje
d	Tasa de descuento	Porcentaje
h	Costo de rehabilitación del botadero	Usd/ton de estéril

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A2: Función Objetivo y tiempo según cada etapa limitante.

Etapas Limitante	Tiempo de Producción	Función de aporte del VAN
Mina	$t_m = \frac{Q_m}{M}$	$v_{mina} = \{(s - r) * y * \bar{g} + h - c\} * Qc - \left\{m + h + \frac{f + Vd}{M}\right\} * Qm$
Planta	$t_c = \frac{Q_c}{C}$	$v_{planta} = \left\{(s - r) * y * \bar{g} + h - c - \frac{f + Vd}{C}\right\} * Qc - m * Qm$
Fundición & Refinería	$t_r = \frac{Q_r}{R}$	$v_{refineria} = \left[\left\{s - r - \left(\frac{f + Vd}{R}\right)\right\} * y * \bar{g} - c + h\right] Qc - m * Qm$

Fuente: Ahmadi, 2018.

Tabla A3: Ley de Corte Optima según la etapa limitante.

Etapas Limitante	Ecuación de ley de corte Optima
Mina	$g_{mina} = \frac{c - h}{(s - r) \cdot y}$
Planta	$g_{planta} = \frac{c + \frac{f + Vd}{C} - h}{(s - r) \cdot y}$
Fundición & Refinería	$g_{refineria} = \frac{c - h}{\left\{s - r - \left(\frac{f + Vd}{R}\right)\right\} \cdot y}$

Fuente: Ahmadi, 2018

Tabla A4: Leyes de corte del balance según la combinación de etapas limitantes.

Etapas Limitantes	Ecuación de ley de corte del balance
Mina-Planta	$g_{mc} = 1 - \frac{C}{M}$
Planta-Refinería	$g_{cr} = \frac{2R}{C} - 1$
Mina-Refinería	$g_{rm} = \left(1 - \frac{2R}{M}\right)^{0.5}$

Fuente: Ahmadi, 2018.

Tabla A5: Distribución del Tonelaje - Ley de la base de datos ficticia "Esmeralda".

Ley Mínima %Cu	Ley Máxima %Cu	Tonelaje
0	0,2	60.000.000
0,2	0,4	52.000.000
0,4	0,6	23.000.000
0,6	0,8	17.000.000
0,8	1	12.000.000
1	1,2	9.700.000
1,2	1,4	6.700.000
1,4	1,6	8.900.000
1,6	1,8	4.000.000
1,8	3	5.600.000

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A6: Parámetros Económicos y Técnicos para el análisis de los tres programas computacionales.

Parámetros Económicos	Valor	Unidad
Costo mina	3,5	usd/ton
Costo planta	6,5	usd/ton
Costo venta	1.100	usd/ton de cobre fino
Precio de venta cobre fino	6.615	usd/ton de cobre fino
Costos fijos	20.000.000	usd/año
Tasa de descuento	10%	
Recuperación	88%	
Capacidad mina (M)	---	
Capacidad planta C	15.000.000	ton/año
Capacidad de Refinería R	100.000	ton/año
Precio de venta concentrado	1.708,611	usd/ton de concentrado
Ley del concentrado	30%	
Costos de rehabilitación	0,027306	usd/ton de estéril
Tonelaje total del recurso	198.900.000	toneladas

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A7: Resultados de la modelación de los 24 botaderos en el software Vulcan Maptek.

Parámetro	Caso 1: Altura 40 m	Caso 2: Altura 50 m	Caso 3: Altura 60 m	Caso 4: Altura 80 m
Factor R botadero 1	2,213	1,852	1,730	1,646
Factor R botadero 2	2,044	1,698	1,601	1,487
Factor R botadero 3	1,961	1,585	1,491	1,354
Factor R botadero 4	1,868	1,506	1,413	1,232
Factor R botadero 5	1,786	1,445	1,350	1,186
Factor R botadero 6	1,690	1,385	1,288	1,093
Promedio	1,927	1,579	1,479	1,333
Varianza muestral	0,029	0,025	0,023	0,035
Desviación típica	0,171	0,158	0,150	0,188
CV %	8,889	10,000	10,163	14,075

Fuente: Elaboración Propia en base al programa Maptek Vulcan, 2021.

Tabla A8: Resultados de valores económicos y leyes usando el programa "Algoritmo de Lane".

Años	VAN usd	beneficio anual usd	Ley de Corte en %Cu	ley media en %Cu
1	1.917.379.460	423.761.851	0,425	0,905
2	1.493.617.609	391.445.308	0,384	0,851
3	1.137.758.238	365.967.018	0,349	0,805
4	835.306.157	337.302.425	0,312	0,756
5	581.885.853	317.073.886	0,277	0,718
6	365.320.122	298.451.188	0,242	0,684
7	180.005.415	278.106.675	0,205	0,648
8	23.021.447	44.862.288	0,167	0,612

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A9: Resultados del tonelaje de material extraído, mineral procesado y cobre vendido usando el programa "Algoritmo de Lane".

Años	Ton de Material	Ton de Mineral	Ton de Producto	Ton de concentrado
1	35.519.479	15.000.000	100.000	67.096
2	32.799.120	15.000.000	100.000	42.566
3	29.804.601	15.000.000	100.000	21.472
4	27.189.075	15.000.000	99.782	-
5	25.121.206	15.000.000	94.791	-
6	23.303.433	15.000.000	90.252	-
7	21.667.976	15.000.000	85.517	-
8	3.495.110	2.614.714	14.071	-

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A10: Resultados del factor optimizante, valores económicos y leyes usando el programa "GRG Iterativo".

Años	σ óptimos	VAN usd	beneficio anual usd	Ley de Corte en %Cu	ley media en %Cu
1	2,9	1.969.161.097	486.192.784	0,500	1,003
2	2,9	1.482.968.313	442.226.781	0,447	0,933
3	2,9	1.080.943.967	399.452.344	0,396	0,866
4	2,9	750.818.063	371.672.609	0,357	0,815
5	2,9	471.574.931	339.232.877	0,315	0,759
6	2,9	239.874.311	315.073.788	0,274	0,714
7	2,9	44.238.278	78.370.808	0,231	0,674

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A11: Resultados del tonelaje de material extraído, mineral procesado y cobre vendido empleando el programa "GRG Iterativo".

Años	Ton de Material	Ton de Mineral	Ton de Producto	Ton de concentrado
1	39.577.855	15.000.000	100.000	112.013
2	36.610.228	15.000.000	100.000	80.154
3	33.935.985	15.000.000	100.000	49.599
4	30.408.067	15.000.000	100.000	26.057
5	27.352.978	15.000.000	100.000	764
6	24.907.471	15.000.000	94.292	-
7	6.107.416	4.014.672	23.799	-

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A12: Resultados del factor optimizante, valores económicos y leyes por año utilizando el programa "GRG Multi año".

Años	RO	VAN usd	beneficio anual usd	Ley de Corte en %Cu	ley media en %Cu
1	17,8	2.037.035.490	486.188.186	0,500	1,003
2	17,8	1.550.847.304	486.188.186	0,500	1,003
3	17,79	1.108.858.043	486.064.915	0,500	1,003
4	17,79	707.151.502	486.064.915	0,500	1,003
5	4,6	341.963.737	291.071.494	0,228	0,671
6	2,34	143.157.990	230.557.375	0,182	0,626

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A13: Tonelaje de material extraído, mineral procesado y cobre vendido en cada año usando el programa "GRG Multi año"

Años	Ton de Material	Ton de Mineral	Ton de Producto	Ton de Concentrado
1	39.577.291	15.000.000	100.000	112.009
2	39.577.291	15.000.000	100.000	112.009
3	39.564.855	15.000.000	100.000	111.911
4	39.564.855	15.000.000	100.000	111.911
5	22.674.355	15.000.000	88.512	-
6	17.941.352	13.027.499	71.720	-

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A14: Valores económicos del costo de extracción del mineral y estéril insertados en el algoritmo de Lane.

Parámetro	Valor	Unidad
Costo de extracción del mineral	3,5	Usd/ton de mineral
Costo de extracción del estéril	2,5	Usd/ton de estéril

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A15: Efecto de la variación del costo de extracción del estéril sobre el VAN, considerando cada uno de los tres algoritmos desarrollados.

Tipo de Escenario	Delta	VAN MUSD: Algoritmo de Lane	VAN MUSD: Algoritmo "GRG Iterativo"	VAN MUSD: Algoritmo "GRG Multi Año"
Sin economías de escalas m = 3,5	0	1.917,379	1.969,161	2.037,035
Con economías de escalas m = 3,5 y e = 2,5	1	2.026,916	2.054,424	2.138,124
Con economías de escalas m = 3,5 y e = 2	1,5	2.087,466	2.096,544	2.190,876
Con economías de escalas m = 3,5 y e = 1,5	2	2.144,893	2.144,893	2.242,517

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Tabla A16: Incremento porcentual del VAN tomando como caso base el escenario donde no existen economías de escalas.

Delta	Algoritmo de Lane	Algoritmo "GRG Iterativo"	Algoritmo "GRG Multi Año"	Incremento Porcentual Promedio
1	5,71%	4,33%	4,96%	5,00%
1,5	8,87%	6,47%	7,55%	7,63%
2	11,87%	8,92%	10,09%	10,29%

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

Apéndice de Figuras

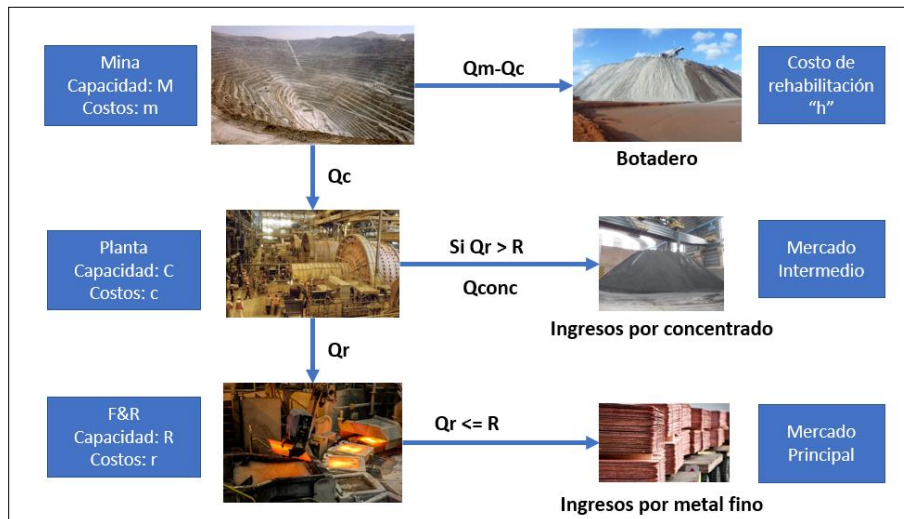


Figura A1: Flujo de procesos y etapas dentro del negocio minero contemplado para el desarrollo de los tres programas computacionales.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

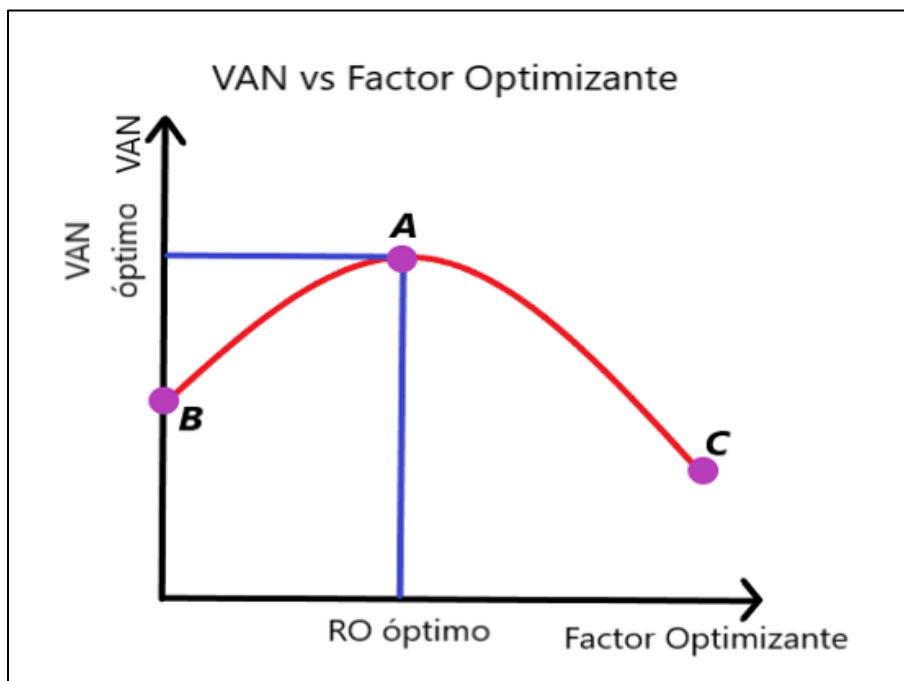


Figura A2: Representación gráfica del efecto de la inserción del factor optimizante en la mejora del VAN.

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

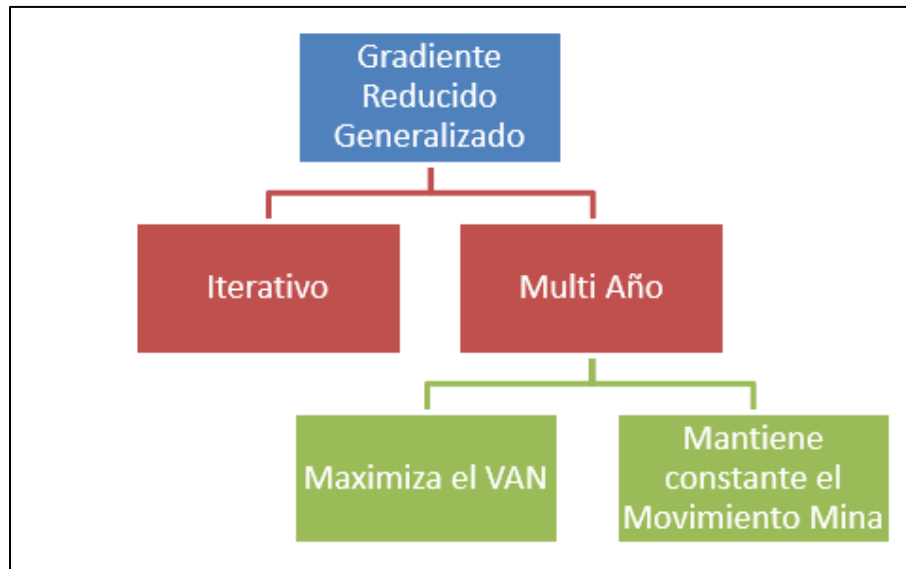


Figura A3: Diagrama de los dos programas computacionales basados en el algoritmo "GRG" con sus variantes.
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

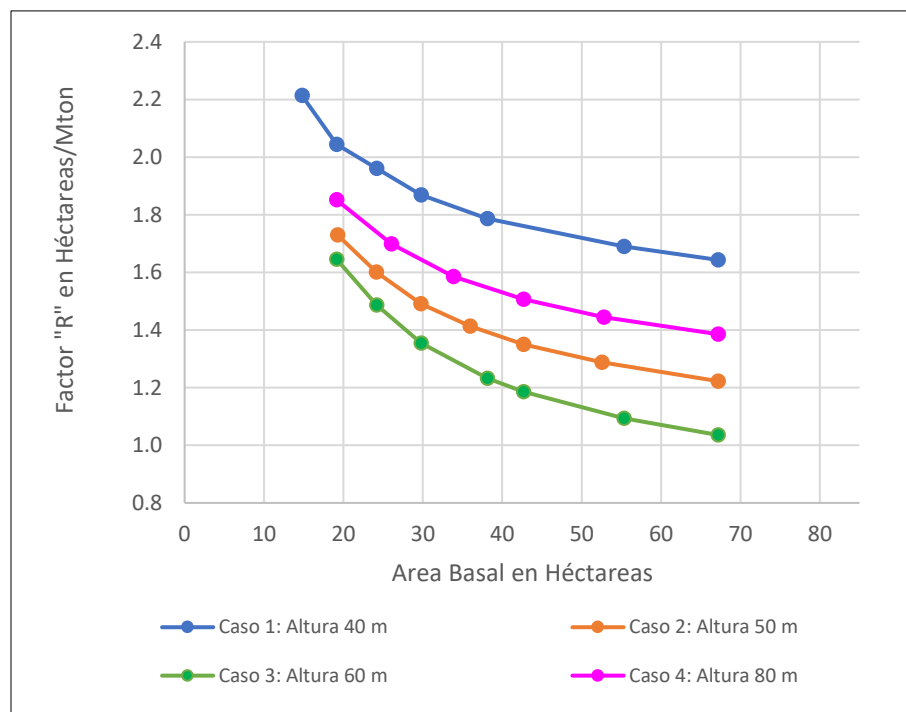


Figura A4: Resultados del Factor "R" en función del área basal y de la altura del botadero.
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

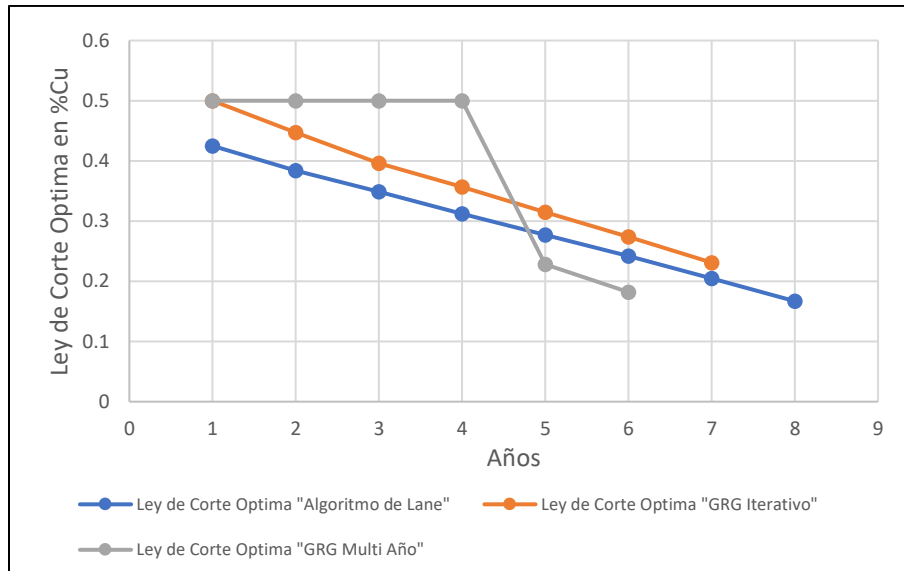


Figura A5: Leyes de Corte Óptimas obtenidas con los 3 programas desarrollados.
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

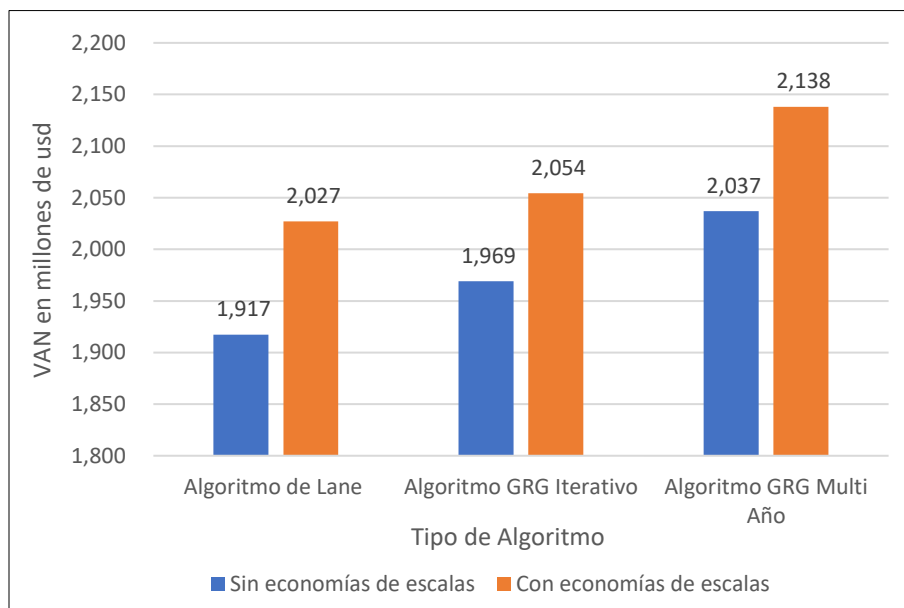


Figura A6: Efecto de la inclusión de las "economías de escalas" en cada algoritmo desarrollado.
Fuente: Elaboración Propia, 2021.

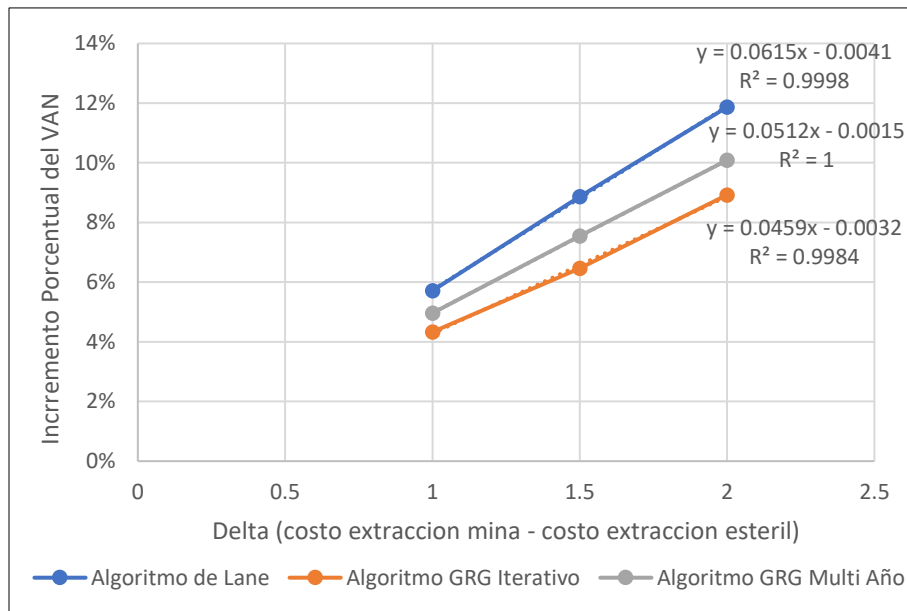


Figura A7: Incremento Porcentual del VAN vs Costo de extracción del estéril.
Fuente: Elaboración Propia, 2021.