

Aumento de la Recuperación de Cobre, Mediante la Optimización del Proceso de Lixiviación.

Héctor J. Fuentes Castillo¹

1. Departamento de Industria y Negocios, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Copiapó; hector.fuentes@industria.uda.cl

Resumen

El presente estudio intenta resolver la problemática que se encuentran la mayoría de las mineras hoy en día; baja recuperación de cobre, lo que se debe fundamentalmente a la disminución progresiva de la ley del mineral, menor proporción de óxidos y el incremento de minerales sulfurados. La problemática se enfrenta considerando todo el proceso de lixiviación como una caja negra, que absorbe los insumos necesarios para obtener una cierta cantidad de cobre recuperado. De esta manera, se intenta mejorar lo realizado hasta ahora, potenciando ciertos elementos y procedimientos, que optimizarán de manera notable las actuales condiciones. El resultado es el esperado, se logra incrementar en importantes porcentajes la producción de cobre, lo que redundará en mejores índices de rentabilidad global para la compañía. En el presente documento se detalla un Diseño Óptimo de la Pila de Lixiviación, teniendo como base 24 pruebas piloto en columnas donde se aplicaron diferentes condiciones de diseño. Dado los resultados obtenidos en estas 24 pruebas de duración aproximada a los 300 días de operación. Se utilizaron las Variables de entrada como leyes y de entrada al proceso como variable fundamental la Altura de Operación, entre otras. Una vez obtenidos los resultados se realizó un Análisis Multivariable de Regresión Lineal a Través del Software Minitab, determinando un Modelo que predice las recuperaciones en función de las variables óptimas que intervienen en la Recuperación de la Pila. La evaluación económica se ha considerado el periodo comprendido entre los años 2007 hasta el 2024 (cierre de la Mina). El VAN resultante del caso base para el proyecto asciende a US\$ 27.961.000 con un TIR de 31%.

Palabras claves: Recuperación de Cobre, cobre, metalurgia extractiva.

Abstract

The present study tries to solve the problematic one that is nowadays most of the miners; low copper recovery, which must to the progressive diminution of the law of the mineral, minor fundamentally proportion of oxides and the increase of sulfurated minerals. The problematic one faces considering all the leaching process like a black box, that absorbs the insumos necessary to obtain a certain amount of recovered copper. This way, it is tried to improve the made thing until now, being harnessed certain elements and procedures, that they will optimize of remarkable way the present conditions. The result is the hoped one, is managed to increase in important percentage the copper production, which results in better indices of global yield for the company. In the present document they detail Optimal Diseño of Pila de Lixiviación, having as it bases 24 tests pilots on columns where different conditions of design were applied. Given the results obtained in these 24 approximated structural tests to the 300 days of operation. They were used the Variables of entrance like laws and entrance to the process like fundamental variable the Height of Operation, among others. Once obtained the results I am made a Multi-variate Analysis of Linear Regression through Software Minitab, having determined a Model that predicts the recoveries based on the optimal variables that take part in the Recovery of Pila. The economic evaluation has considered the period between years 2007 until the 2024 (it closes of the Mine). The VAN resulting of the case bases for the project promotes to US\$ 27.961.000 with a TIR of 31%.

Keywords: Copper recuperation, Copper, Metallurgy extractive.

1. Introducción

El presente trabajo basa sus estudios en una Compañía de la gran Minería del cobre. La planta a estudiar posee un diseño de producción de cobre fino a recuperar, basado en un sistema de lixiviación, debido a un cambio del tipo de mineral (óxidos a sulfuros). Asociado a lo anterior, la compañía se encuentra limitada al espacio físico en el desarrollo del proceso productivo de la Pila Dinámica², lo que impide procesar el mineral por más tiempo, debido a que se debe remover el mineral antiguo para cargar el actual.

La importancia de la presente investigación, radica en proponer soluciones alternativas a la problemática de recuperaciones de cobre de un 60% para los minerales sulfurados en comparación con el 82% que se presenta en los óxidos. El presente estudio establece una propuesta de diseño que pretende identificar y alterar las variables críticas del diseño. Para lo cual, se realizaron 24 pruebas piloto que son de duración restringida a un año cada una, para una vez evaluarlas a la luz de los resultados, y de acuerdo a las proyecciones planteadas implementarlas en la compañía.

2. Modelo matemático de recuperación de cobre en función de variables que intervienen en el diseño de pila de lixiviación.

El objetivo de esta etapa fue determinar un Modelo Matemático que permita maximizar la recuperación de cobre, en función de las variables que intervienen en el Diseño Óptimo de Lixiviación.

2.1.- Pruebas Piloto y Variables Utilizadas.

Debido a que es necesario tener una base de datos robusta, que permita una buena relación entre las variables que intervienen en el proceso de lixiviación en pilas, se utilizó la información de 24 pruebas pilotos, con una duración aproximada de un año, porque estas presentan todas las condiciones requeridas para determinar el modelo que se busca.

2.2. Variables que intervienen en el Proceso de Lixiviación

Las variables más importantes que afectan la recuperación son:

- Mineral Cobre Soluble (%): (AsCu)
- Mineral Cobre Insoluble en Acido (%) : (CuS)
- Acidez en Curado (Kg. H₂SO₄/ton Mineral) : (AC)
- Altura de Pila (m): (H)
- Tasa de Riego (L/(h*m²)): (T)
- Ciclo de Prueba (h) : (C)
- Densidad Mineral (ton/m³) : (D)
- Acidez en Solución (Kg. H₂SO₄/m³) : (A)

Las pruebas se realizaron en columnas, estas representan las variables mencionadas y en diferentes condiciones (Ver Tabla 1), se han denominado variables de entrada al tipo de mineral y variables de entrada de proceso, H, T, C, D y A. La variable de salida representa el producto y esta es la recuperación, una vez concluido el ciclo de la prueba (C). Es necesario mencionar que además existe un sin número de variables que afectan en la recuperación, como por ejemplo la distribución de granos, la temperatura, la tasa de aire, el marco de riego, el tipo de goteo, pero estas variables tienen un porcentaje bajo en comparación con las que se sugieren, pero no dejan de ser importantes en el momento de aumentar la recuperación. La altura sin lugar a dudas es una variable fundamental para determinar el diseño óptimo, debido a que los minerales oxidados no se ven afectados hasta los 10 m de altura, pero los sulfuros sobre los 8 m de altura, la recuperación alcanza un porcentaje del orden de 44%. Es por este motivo la justificación de la búsqueda del modelo que prediga la recuperación de los minerales sulfurados que serán procesados en los próximos años.

² Pila de lixiviación, que es removida al término de su ciclo

Tabla 1: Pruebas Piloto. Variables de Entrada y Salida.

Columna	Variable Entrada			Variables de Entrada a Pruebas Pilotos									Variable Salida
	CuT %	AsCu %	CuS %	Ácido Curado Kg. H ₂ SO ₄ Ton	Inyección H ₂ SO ₄ Kg H ₂ SO ₄ Ton Min.	Altura (H) m	Gran . p80	Tasa (T) L/ (h*m ²)	Ciclo (C) (días)	Densidad (D) Ton m ³	T*C (H*D) m ³ ton	Σ V*kg H ₂ SO ₄ SV Kg. H ₂ SO ₄ m ³	Rec. %
1	0,93	0,22	0,66	9,30	20,24	8,0	11,50	5	300	1,44	3	6,52	55,0
2	0,93	0,22	0,66	9,30	14,24	10,0	11,50	5	285	1,45	2	6,07	52,6
3	0,93	0,22	0,66	9,30	12,48	12,0	11,50	5	300	1,47	2	6,15	51,2
4	0,72	0,21	0,48	10,00	26,59	6,0	11,50	5	313	1,25	5	5,46	66,5
5	0,69	0,20	0,47	10,00	26,56	6,0	11,50	5	314	1,25	5	5,45	65,9
6	0,74	0,22	0,47	10,00	44,15	6,0	11,50	8	315	1,26	8	5,64	59,2
7	0,72	0,21	0,48	10,00	42,37	6,0	11,50	8	315	1,27	8	5,45	64,3
8	3,61	0,29	3,27	10,00	19,05	6,0	11,00	5	206	1,24	3	5,94	29,8
9	3,33	0,30	2,86	10,00	18,91	6,0	12,00	5	207	1,24	3	5,84	36,7
10	2,99	0,32	2,62	10,00	19,19	6,0	13,00	5	208	1,24	3	5,96	21,0
11	0,37	0,07	0,28	10,00	19,17	6,0	11,00	5	207	1,24	3	5,98	68,0
12	0,33	0,06	0,27	10,00	19,45	6,0	12,00	5	209	1,24	3	5,98	66,4
13	0,33	0,07	0,25	10,00	19,40	6,0	13,00	5	208	1,24	3	5,99	69,6
14	1,41	1,34	0,06	10,00	19,61	6,0	11,00	5	212	1,24	3	6,00	74,5
15	1,40	1,33	0,05	10,00	19,56	6,0	12,00	5	211	1,24	3	6,01	72,7
16	1,43	1,33	0,05	10,00	19,56	6,0	13,00	5	211	1,24	3	6,01	64,9
17	0,87	0,09	0,72	9,10	52,10	1,5	11,50	5	184	1,23	12	4,40	54,7
18	0,87	0,09	0,72	9,10	50,77	1,5	11,50	5	185	1,23	12	4,39	64,9
19	0,87	0,09	0,72	9,10	48,12	1,5	11,50	5	182	1,23	12	4,23	69,3
20	0,87	0,09	0,72	9,10	46,09	1,5	11,50	5	177	1,23	12	4,44	71,2
21	0,69	0,23	0,42	10,00	73,82	0,5	11,50	5	110	1,63	16	4,63	71,9
22	0,69	0,23	0,42	10,00	68,58	0,5	11,50	5	109	1,73	15	4,66	71,8
23	0,69	0,23	0,42	10,00	77,61	0,5	11,50	5	109	1,54	17	4,67	71,5
24	0,69	0,23	0,42	10,00	73,16	0,5	11,50	5	108	1,63	16	4,70	73,3

2.3. Modelo de Recuperación Matemático

A través de los datos de la Tabla 1, se ha planteado el Modelo Matemático que predice la recuperación de cobre en función de las variables. La ecuación que rige el modelo de recuperación es como sigue:

$$\text{Rec.} = \beta_1 * 10 * \text{AsCu} + \beta_2 * 10 * \text{CuS} + \beta_3 * \text{R.L} * \text{A} + \text{Cte}$$

Donde

AsCu y CuS, Tipo de Mineral

- AsCu * 10 = Kg. Cobre/ton Mineral
- CuS * 10 = Kg. Cobre/ton Mineral
- R.L, corresponde a la Razón de Lixiviación (m^3/ton): $T * C / (H * D)$
- T = tasa de riego ($\text{L}/(\text{h} * \text{m}^2)$)
- C = ciclo de riego (h)
- H = altura de Pila (m)
- D = densidad del mineral (ton/m^3)
- A, es la Acidez en Solución ($\text{Kg. H}_2\text{SO}_4/\text{m}^3$) : $\Sigma Vx * \text{Kg. H}_2\text{SO}_4 / \text{SV}$
- Corresponde a la sumatoria total del volumen día a día de solución por cada concentración de ácido hasta el término del ciclo.
- V = volumen de solución lixivante ingresado a prueba (m^3)
- Kg. H_2SO_4 = kilos de ácido adicionados a través de solución ($\text{Kg. H}_2\text{SO}_4$)
- SV = Suma total de V al término del ciclo (m^3)

En consecuencia, lo que se busca en la función es determinar β_1 , β_2 , β_3 más una Cte.

2.4. Minitab

El Minitab es una herramienta informática enfocada al análisis de datos complejos y a la identificación y resolución de problemas relativos a procesos, por ello es un instrumento fundamental para todas aquellas compañías con procesos productivos que requieren de un software de análisis para poder controlar fácilmente esos procesos o mejorar el rendimiento de sus cadenas de producción.

2.5. Modelo de Recuperación Matemático.

El modelo de Recuperación propuesto está basado en el Software Minitab. Una vez ingresadas las variables de entrada, de proceso y de salida al Minitab, se determinaron los coeficientes y la constante que rigen la ecuación de recuperación como sigue:

- $\beta_1 = 0,248$
- $\beta_2 = 1,33$
- $\beta_3 = 0,176$
- Cte = 64,1

Por lo tanto, el Modelo Matemático quedo expresado de la siguiente forma:

$$\text{Rec.} = 24,8 * \text{AsCu} - 13,3 * \text{CuS} + 0,176 * T * C / (H * D) * A + 64,1$$

2.6. Análisis ANOVA

Dado que el Minitab entrega el Análisis de la Varianza (ANOVA). Este análisis (Ver Tabla 2) permite determinar cuan dispersos se encuentran los datos con respecto a la media además de entregar la correlación entre las variables con respecto a una recta (R), como también el P-Valor, que permite decidir si la recta puede ser un modelo de relación significativo por debajo de 0,05, además de rechazar la Hipótesis Nula (medias son iguales). El coeficiente de Determinación ajustado R-Sq (adj) que es el resultado de elevar al cuadrado el coeficiente de correlación y este es de 83,3%, por lo tanto, se puede inferir que la calidad del ajuste es medianamente bueno, en este capítulo se desarrollaron una serie de modelos posibles, pero este determina a ciencia cierta que un aumento de altura afecta directamente la recuperación de cobre más aún cuando se trata de sulfuros, tal vez existan muchos modelos que puedan superar esta relación entre las variables, pero el modelo se ajusta a realidad cosa que otros modelos que se encontraron sobre la misma base de datos "no representan al proceso" y al establecer la relación de altura con la recuperación se establece una relación directamente proporcional.

El P-Valor es igual a cero, por lo tanto, este modelo revela que la regresión lineal múltiple es estadísticamente significativa.

Tabla 2: ANOVA del Minitab.

Recurso	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	3972	1323	39,3	0.00
Error Residual	20	674	34		
Total	23	4645			

S = 5,8 R-Sq = 85,5% R-Sq(adj) = 83,3%

2.7. Restricciones del Modelo

Las restricciones que debe tener el modelo, está en función, de las condiciones mínimas de operación y que se basan en la experiencia del autor. Donde las variables:

- $AsCu \geq 0,02$ y $CuS \geq 0,02$
- $T \leq 8$
- $C \geq 150$
- $H \leq 12$
- $D \geq 1,2$
- $A \geq 5$

Considerando además que la recuperación no debe ser mayor a 100%.

2.8. Modelo Óptimo

Para definir el Modelo Optimo, se debe determinar las variables que afectan al proceso, como la altura en diseño y las variables que dentro del diseño afectan a la recuperación.

- T = 8 (L/(h*m²))
- C = 410 (días)
- H = 8 (Altura de Pila)
- D = 1,6 (Densidad del Mineral)
- A = 7 (Kg. H₂SO₄/ton. Mineral)

Por lo tanto, para el año 2007 con leyes de 0,52 en AsCu y 0,23 de CuS la recuperación esperada es de 80%.

3. Evaluación económica

3.1. Análisis económico

A realizar, se consideran las siguientes variables para el Flujo de Caja (Ver Tabla 3);

- La Tasa de Descuento a utilizar es de un 5%.
- Los Impuestos por Ventas sobre las utilidades son de 35%.
- La depreciación es lineal.
- El monto de la inversión, para cada alternativa a evaluar, es otorgado por el mismo particular, por lo tanto, no es necesario ningún tipo de crédito, en consecuencia, en los flujos no existirá créditos ni amortizaciones y obviamente el primer periodo se considera un flujo negativo.
- Cada flujo se realizará en miles de dólares (MUS \$).
- Los ingresos por ventas, son calculados en base a los aportes en cobre fino para cada proyecto.
- Los costos de Producción serán calculadas en base a los requerimientos periódicos que necesita la Pila, como cambio de goteros en forma anual y termofilm.
- Los egresos operacionales que se considerarán será la utilización de energía, reposición de agua y consumo de ácido.
- Precio del cobre para los dos primeros periodos se considerará de; 240 y 200³, Ctv\$U\$/Libra y los siguientes de 100 ctvs

Tabla 3: Flujo de Caja

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ingreso por Ventas	0	10.274	8.335	8.279	8.330	6.714	6.898	3.770	3.820	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782	3.782
Costo Producción (piping)	0	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Utilidad Bruta	0	10.119	8.180	8.125	8.176	6.559	6.743	3.615	3.666	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628	3.628
Egreso Op. (Energia, Agua, Acido)	0	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130	1.130
Utilidad Operacional	0	8.989	7.050	6.994	7.045	5.429	5.613	2.485	2.535	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497	2.497
Depreciación	0	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Interes L.P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
Interes CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida Ej. Anterior		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
Utilidad Antes del Imp.	0	8.891	6.952	6.897	6.948	5.331	5.515	2.387	2.437	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399	2.399	2.397	2.395
Impuestos Sobre Util. (35%)	0	3.112	2.433	2.414	2.432	1.866	1.930	835	853	840	840	840	840	840	840	840	840	839	838
Utilid, despues del imp.	0	5.779	4.519	4.483	4.516	3.465	3.585	1.552	1.584	1.560	1.560	1.560	1.560	1.560	1.560	1.560	1.560	1.558	1.557
Perdida Ejerc. Anterio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
Capital de Trabajo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión	5.833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización L.P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortización C.P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación	0	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Valor Residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Impto Ventas Activos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Periodo	0	5.877	4.617	4.581	4.614	3.563	3.683	1.650	1.682	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657
Credito	0																		
Flujo Total Periodo	-5.833	5.877	4.617	4.581	4.614	3.563	3.683	1.650	1.682	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657	1.657

1. Conclusiones

Al finalizar este estudio se puede concluir.

El cobre total, usado como variable de entrada en las diversas pruebas pilotos (Anexo 1), fue tomado del rajo según el avance natural de la faena (compositos), considerando concentraciones parecidas de azufre y arsénicos al menos en grupos de tres, con objeto de analizar el efecto real de las variables de diseño en la recuperación del cobre. Es así como se encontraron variables con incidencia directa en la recuperación, siendo el ciclo de duración una de ellas, sin embargo al ser un modelo multivariable la incidencia de cada una por si sola, no tiene una gran validez en el diseño, siendo necesario la combinación de dos o más variables.

Las pruebas pilotos, nos entregan otro dato importante, que sin importar la concentración de cobre total, es relevante para el diseño, la concentración de azufre que posea el material de entrada, es decir altas concentraciones de azufre, prometen alta recuperación.

Es posible aumentar los retornos a los accionistas a través de un Diseño de Tamaño Óptimo de Planta, el que debe tener como variable de diseño más importante, la altura.

El modelo de Recuperación, predice muy bien las recuperaciones para los próximos años, la relación entre las variables es de 83.3%, pero la tendencia en el periodo 2007 al 2009 en función al tipo de mineral es Sulfuro, por lo anterior la recuperación tiende a bajar.

Las recuperaciones para Minerales Ripios es de 33% al cabo de un año de lixiviación.

Un aumento del 1% en recuperación de cobre fino, para las dimensiones de la faena estudiada, es equivalente a U\$ 1.620.000, dado el precio que alcanza hoy el cobre..

La metodología aplicada en este trabajo para obtener un modelo matemático de recuperación de cobre, es posible utilizarla en todas las mineras de nuestro país y más aún en todos los procesos de lixiviación, siendo estos de cobre, oro, relaves, etc.

5. Referencias

Jochen Petersen y David G. Dixon,, Pila de Lixiviación, paquete de Simulación, montado en HeapSim Ver. 2.03, pg 12 a 16, Noviembre de, 2003.

Jorge Beckel, El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile. Series CEPAL Mayo, 2000. ISBN 92-1-321603-3

Manuel Olivares, S Andres Olea, S Werner Schlein, Minerales revista, 1999 - Instituto de Ingenieros de Minas de Chile

Herreros, O.; Fuentes, G.; Quiroz, R.; Viñals, J., Revista de metalurgia, 2003 MAR-ABR; 39 (2), ISSN 0348570

Enlaces Web

<http://www.minitab.com>. Software de Regresión Lineal Multivariable
<http://www.cochilco.cl>