
ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MINERA: CONO FLOTANTE Y LERCHS-GROSSMANN UTILIZANDO GEMCOM SURPAC Y UPL

ANALYSIS OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR MINING: FLOATING CONE AND LERCHS - GROSSMANN USING GEMCOM SURPAC AND UPL

María Natalia Vallejo García, Juan Gabriel Baquero Chiquiza & Giovanni Franco Sepúlveda

Grupo Planeamiento Minero

*Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
mnvallej@unal.edu.co; jgbaquer@unal.edu.co; gfranco@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 6 de Septiembre de 2010 / Aceptación: 4 de Octubre de 2010 / Recibida versión final: 21 de Octubre de 2010

RESUMEN

Los límites finales de un open pit pueden ser determinados con ayuda de diversos algoritmos de optimización existentes como son: el del cono flotante y el de Lerchs-Grossmann; estas técnicas se basan en procesos iterativos, para los cuales se han desarrollado distintos programas computacionales que realizan dichos procesos.

En este artículo se presenta la aplicación de estas dos técnicas a un depósito de caliza hipotético, aplicación que será ejecutada por dos herramientas computacionales distintas; la primera una macro de Excel denominada "UPL" Ultimate Pit Limit, y la otra es Surpac de Gemcom, esta evaluación conduce finalmente a la comparación de los resultados arrojados.

PALABRAS CLAVES: Minería de Superficie; Optimización; UPL; Lerchs-Grossmann; Límite Final de Pit; Caliza.

ABSTRACT

The final limits of an open-pit mine may be designed by using the diverse optimizing algorithms available, such as the floating cone and the Lerchs and Grossmann. These techniques are based on iterative processes, for which they have developed several computer programs that perform these processes.

In this paper we will present the application of these two techniques in a hypothetical limestone deposit, by running two different computer tools: an Excel macro called Ultimate Pit Limit (UPL), and Surpac by Gemcom. This hypothetical evaluation will finally lead to the comparison of the results obtained.

KEY WORDS: Surface Mining; Optimization; Algorithm; UPL; Lerchs-Grossmann; Final Pit Limit; Limestone.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación económica de un macizo rocoso suele ser una tarea bastante engorrosa a la que se ven enfrentados la mayoría de Ingenieros de Minas, a la hora de realizar un planeamiento adecuado, en la secuencia de extracción y límites de explotación del material de un proyecto minero que maximice los ingresos obtenidos, puesto que se hace necesario conocer la mayoría de variables posibles, para poder realizar una predicción del beneficio de la extracción con un buen nivel de confianza.

Existen distintos métodos para evaluar estas variables; este artículo se centrará en la aplicación del algoritmo de Lerchs-Grossmann y el del cono flotante a un depósito hipotético, en el cual se genera el pit óptimo estableciendo los límites de este en el punto en el cual se maximizan los ingresos, y definiendo la secuencia de extracción del material contenido dentro de los límites de este pit.

Estos métodos son ampliamente usados en depósitos masivos y diseminados, y en menor medida en depósitos estratificados siempre y cuando sean horizontales y sub horizontales.

Debido a que uno de los parámetros importantes dentro del diseño de una explotación a cielo abierto es la definición de los límites físicos de la explotación, estos métodos son usados como base en el software de simulación y optimización minera de mayor distribución en el mundo, y finalmente llevados al manejo de estos algoritmos en Microsoft Excel.

En la parte final del artículo se demostrará que para el algoritmo de Lerchs-Grossmann las herramientas (Surpac y UPL) no tienen grandes diferencias cuantitativas, en cuanto a cantidad de bloques a minar y ganancia neta se refiere, pero sí difieren gráficamente en la configuración del pit, esto principalmente debido a condicionamientos en la operación del UPL. Por otra parte, para el método del cono flotante sucede lo contrario, pues la geometría final del pit dada por las dos herramientas es bastante similar, pero los resultados cuantitativos, en especial la ganancia, difiere de manera considerable de una herramienta a otra siendo la del UPL la más conservadora.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cono flotante

El método del cono flotante es una de las técnicas más ampliamente aceptada en el diseño de los límites finales de un pit, porque es de rápida ejecución, veloz y de fácil conceptualización.

La programación lógica incluida es empleada después del método convencional de secciones-transversales, se procede a utilizar un llamado punto equilibrio en el radio de área a descapotar como criterio básico de optimización.

La principal diferencia con técnicas manuales, es que esta utiliza el concepto de cono flotante en tres dimensiones (alto, ancho, profundo) para remover incrementos en lugar de secciones verticales para generar la geometría final del pit. Un pit es generado y analizado mediante la construcción de una forma cónica en dirección inversa y moviendo su vórtice de un bloque de mena a otro.

La forma del cono es definida de manera tal que esté conforme con las restricciones de pendiente de diseño del pit en las distintas áreas del depósito. El computador es utilizado en la generación de las configuraciones cónicas 3D y en el cálculo del valor neto de cada cono, mediante la suma de los valores de todos los bloques de mena y estéril encerrados dentro del cono. Finalmente, un límite 3D del pit es obtenido mediante la remoción del frustrum de todos los conos con valor neto positivo.

El método del cono flotante es significativamente restrictivo, debido a la gran cantidad de esfuerzo computacional requerido. Ciertamente, la determinación de un soporte mutuo entre conos solapados, no es usualmente requerida debido a que usan más implementaciones del algoritmo del cono flotante. El método finaliza sus iteraciones después de que los conos tienen sus vértices localizados en todos los bloques de mena positivos que han sido evaluados. Por esta razón, el método heurístico del cono flotante muchas veces falla para generar verdaderos límites finales del pit.

En un intento por considerar el soporte mutuo entre conos, técnicas más eficientes aplican sofisticadas programaciones matemáticas. Además de la aplicación de sistemas conceptuales de análisis que han sido desarrollados.

2.2. Lerchs-Grossmann

Este algoritmo de programación dinámica original fue demostrado en el diseño de la configuración óptima de bloques para ser removidos en una sección transversal bi-dimensional (2D) (Lerchs-Grossmann, 1965). Tomando una sección transversal 2D de un modelo de bloques y las restricciones de ángulo de pared final definidas. El algoritmo procede calculando la suma de la columna de valores originales de bloques para cada bloque. Este valor de la suma de la columna representa un valor acumulativo, realizando una extracción de una sola columna vertical, desde la parte de arriba del modelo de bloques para cada bloque individual.

A continuación, se asigna columna-por-columna iniciando desde cualquier punto final de una columna de la sección transversal, un valor de pit representando el máximo valor del pit potencial 2D es computado para cada bloque. Este valor de pit es calculado de la suma de los valores de los bloques de la columna, y el valor predeterminado del pit de un bloque adyacente a la columna previa. Este nuevo valor es la contribución máxima posible del inicial fin de columna para la columna que contiene tal bloque para cualquier pit 2D posible que contiene el bloque en su contorno. Una flecha se usa para indicar el bloque adyacente que proporciona el máximo valor para calcular el valor del pit de un bloque en particular. El límite final del pit es entonces determinado al trazar hacia atrás las flechas obtenidas desde el bloque en el nivel superior que tiene el máximo valor de pit.

La aproximación a la programación dinámica originalmente definida por (Lerchs-Grossmann 1965) es capaz de generar el contorno óptimo del pit mediante secciones transversales en 2D. Una geometría de pit 3D final es entonces determinada al unir la geometría determinada por múltiples secciones transversales a través del pit. Una verdadera optimización puede no ser obtenida por el ensamble de estas secciones transversales 2D, y generalmente encuentra que el límite final puede también afectar el valor del ángulo final de pit.

La aplicación de la teoría gráfica para el diseño de límites de pit fue creativamente introducido por (Lerchs-Grossmann, 1965) El modelo del algoritmo integra problemas zero-one dentro de la red de ramificaciones. Los vértices son equivalentes a bloques minados, y los arcos direccionados impuestos representan las limitaciones de la pendiente del pit. Estos arcos direccionados indican la relación entre bloques de estéril que deben ser removidos antes de minar un bloque de mena en particular. Entonces cualquier contorno de pit factible es obtenido mediante el cierre de la gráfica. (Lerchs y Grossmann) reconocieron que el pit final es un problema de determinación del cierre de una gráfica con una masa total máxima.

Este algoritmo inicia por cada vértice dentro de cada categoría de nodo positivo ó negativo correspondiente para cada valor de bloque (positivo = potencial mena y negativo = estéril).

Arcos direccionados son generados para representar las limitaciones de la pendiente de un nodo positivo a su nodo negativo sobrepuesto. En general, el algoritmo construye la gráfica de árbol inicial desde los bloques en el nivel superior del modelo de bloques y procede hacia abajo nivel por nivel. El árbol inicial es construido mediante un conjunto de arcos Dummy conectando el nodo Dummy de referencia a todos los vértices. El árbol será entonces transformado en árboles sucesivos siguiendo un conjunto de reglas. El proceso de transformación continúa hasta que ninguna otra transformación es posible. El algoritmo termina en un número infinito de iteraciones.

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelo de Bloques

Se diseñó un modelo de bloques hipotético de un material calcáreo partiendo de un área rectangular de 1000m x 1000m, con una altura de 250m. Dentro de esta área se definieron a mano alzada dos zonas de mineralización con

diferentes calidades, hay una capa de estéril de 10 m sobre la mineralización. En la figura 1, se puede apreciar una vista en planta del nivel Z= 110m de dicho modelo.

Como material estéril se considerara la roca con $\text{CaCO}_3 = 0$, el mineral de alta calidad tiene un contenido de CaCO_3 entre 80 y 95 %, y el mineral de baja calidad tiene un contenido de CaCO_3 entre 65 y 80 %.

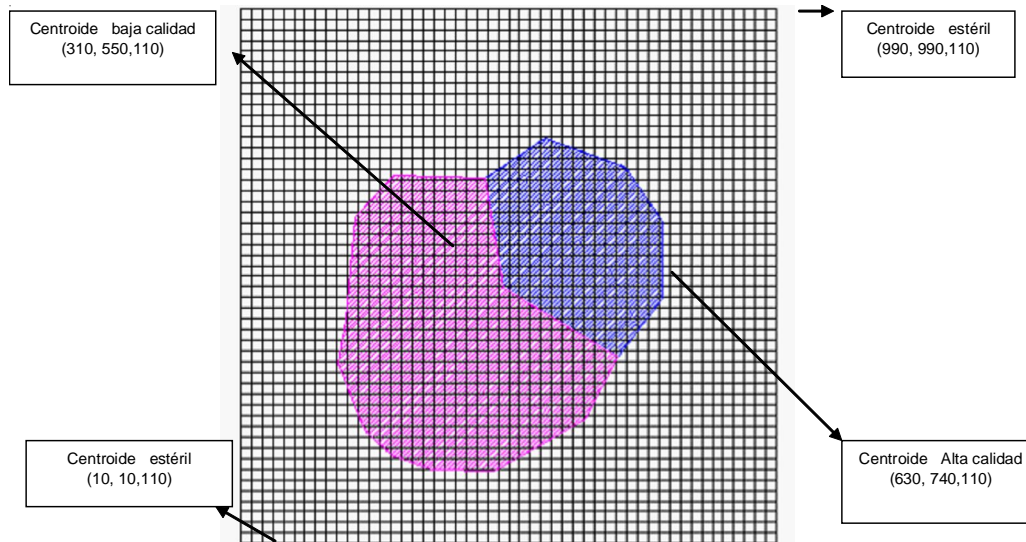


Figura 1. Vista en planta del nivel Z= 110 m de mineralizaciones (Alta y Baja calidad de caliza), malla y centroides.

Para la generación de los datos x, y, z del modelo se generó una malla de 20m x 20m en Autocad. Sobre dicha área, se extrajeron las coordenadas de los centros de cada bloque en tres listas separadas (estéril, alta calidad y baja calidad) para cada nivel Z, con un aumento de 20m por nivel, entre 0m y 250 m. Lo que da como resultado las coordenadas X, Y, Z de cada centroide de bloque con dimensiones 20m x 20m x 20m y un total de 32.500 bloques dentro del modelo.

Las listas generadas se unieron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, a tres columnas X, Y, Z, a esta lista se añadió una cuarta columna a la que se le asignó el % de contenido de carbonatos de cada bloque de acuerdo a los rangos establecidos utilizando la función aleatoria de Microsoft Excel.

Para que los resultados de las optimizaciones a realizar (usando UPL y Surpac) puedan ser comparables, la lista de datos anteriormente descrita será la que alimente la totalidad de optimizaciones, con esta misma finalidad a continuación se definirán los parámetros técnicos y económicos a usar.

3.2. Parámetros económicos y técnicos

A continuación se enumeran y describen los parámetros usados en la entrada de las dos herramientas, estos datos al igual que el modelo son hipotéticos.

- Recuperación: 95% (promedio de recuperación aceptable en minerales industriales de origen calcáreo).
- Precio de venta del mineral: \$ 7.604/t, precio en bocamina caliza (UPME, 2009)
- Costos de extracción mineral: \$ 2.000/t
- Costos de extracción estéril: Generalmente para mineralizaciones calcáreas el material estéril tiene propiedades físicas similares al mineral de interés por tanto se consideran que el precio de extracción para el estéril es el mismo que para el mineral.

- e. Ángulo de pared final: Se considera 45° como ángulo final, con este ángulo se aumenta la confiabilidad de los resultados arrojados por los algoritmos debido a que 45° expresado en relación vertical - horizontal es 1:1, y geotécnicamente es un ángulo estable.
- f. Densidad del estéril: Se considera que la densidad del estéril es de 2.0 ton/m^3 , muy cercana a la del mineral de interés.
- g. Densidad del mineral: Se considera que la densidad del mineral es de 2.1 ton/m^3 , ya que los materiales calcáreos como la caliza tiene un rango de densidades entre (1.8 y 2.2 ton/m^3)

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Luego de la definición del modelo de bloques y de la asignación de los parámetros técnicos y económicos, se muestran a continuación los resultados obtenidos utilizando UPL y SURPAC.

4.1. Ultimate pit limit (upl)

UPL es un programa (macro de Excel) diseñado para calcular el límite pit final para minería a cielo abierto. Mediante este programa se permite la generación de los límites de pit óptimos con los algoritmos de Lerchs-Grossmann y cono flotante.

El macro de Excel requiere la siguiente información de entrada:

- a. Modelo de bloques en hoja de cálculo.
- b. Parámetros económicos y técnicos.

4.1.1. Generación de límite de Pit con UPL

- a. Se introdujo el modelo de bloques en hoja de cálculo bajo el formato en el cual la macro del UPL lo lee: X, Z, Y, % CaCO_3 .
- b. Ahora se alimentan las variables :
 - I. Tamaño de bloques ($x=20, y=20, z=20$)
 - II. Ángulo final de Pit: 45°
- c. Es necesario convertir el modelo de bloques a un modelo económico para que los algoritmos de optimización puedan ser aplicados. Se introducen las variables mencionadas anteriormente.
- d. Se selecciona el algoritmo a utilizar dentro del menú, allí se encuentran disponible los métodos de: Lerchs-Grossmann; Cono flotante y Korobov. Los resultados arrojados son secciones transversales donde se muestran los límites de pit (en este caso hipotético entregara una sección cada 20m), y un cuadro de texto con el número de bloques que entran al pit final y el valor total ó ganancia neta.

Adicionalmente esta macro entrega también la vista en planta de cada nivel de la optimización (en este caso hipotético entregara una vista en planta cada 20m)

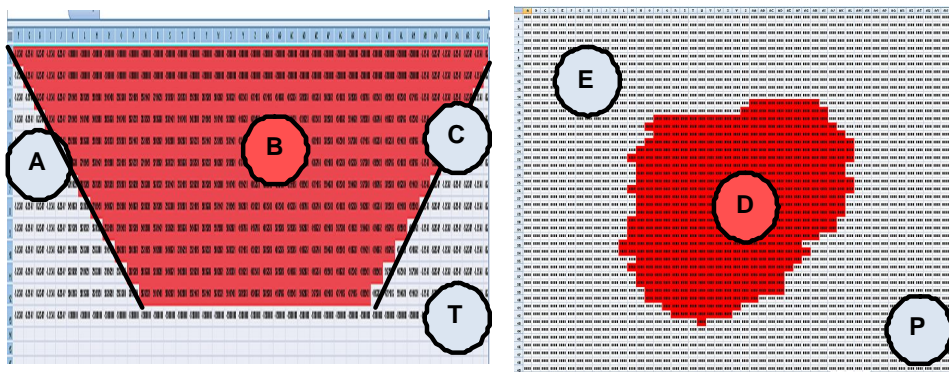


Figura 2: Vista sección transversal (T), Vista en planta (P); Usando UPL.

En la figura 2, se puede ver el formato en el cual UPL entrega las secciones transversales y las vistas en planta del pit optimizado mediante cualquiera de los métodos disponibles. De la figura 2, se puede apreciar: **A**) Bloques que no entran al pit optimizado, **B**) Bloques que conforman el pit optimizado, **C**) límite del pit. En la figura 2, se puede apreciar: **D**) Bloques que conforman el pit optimizado, **E**) Bloques que no entran al pit optimizado.

Los resultados pueden ser exportados a un archivo de Autocad con formato X, Y, Z, el cual puede ser utilizado en un programa de generación de superficies donde se puede ver el pit final, en este caso se han usado los resultados obtenidos con UPL para la optimización del modelo de bloques hipotético mediante los métodos de Lerchs-Grossman y cono flotante. Se han generado sus respectivas superficies, las cuales se muestran a continuación en la figura 3 y 4 respectivamente.

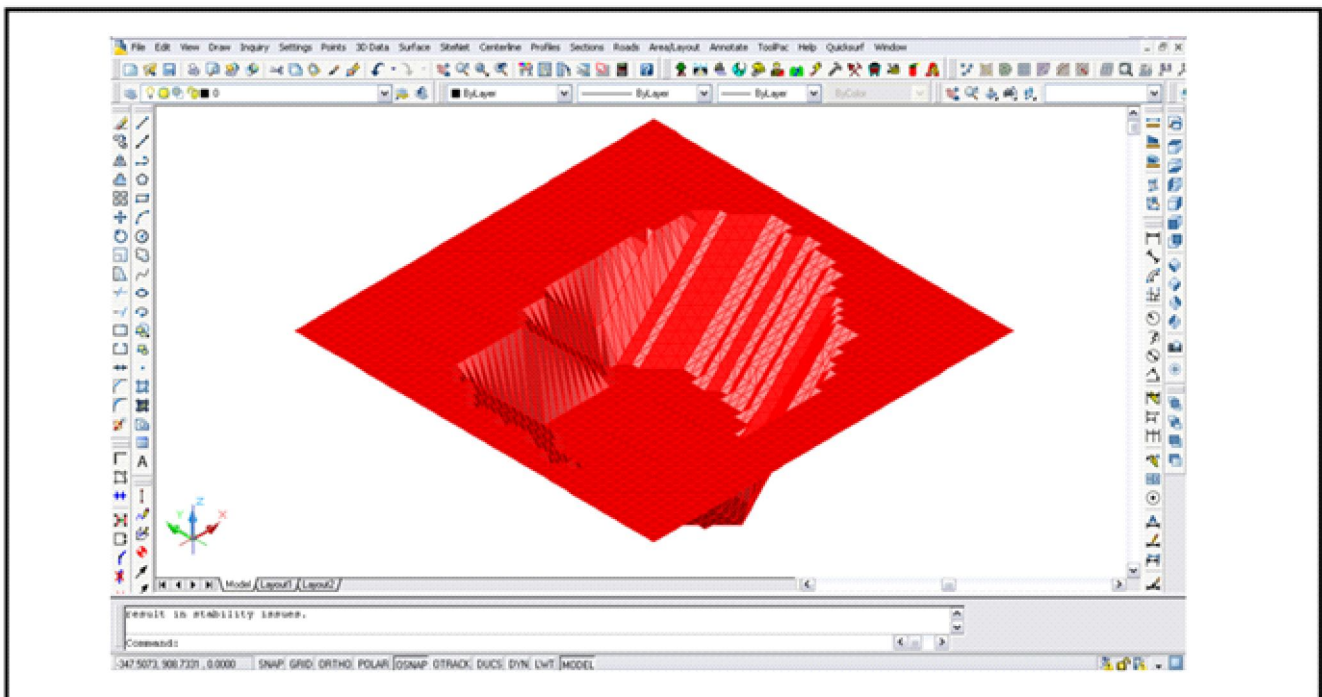


Figura 3. PIT final, Lerchs-Grossman usando UPL; datos exportados a Autocad.

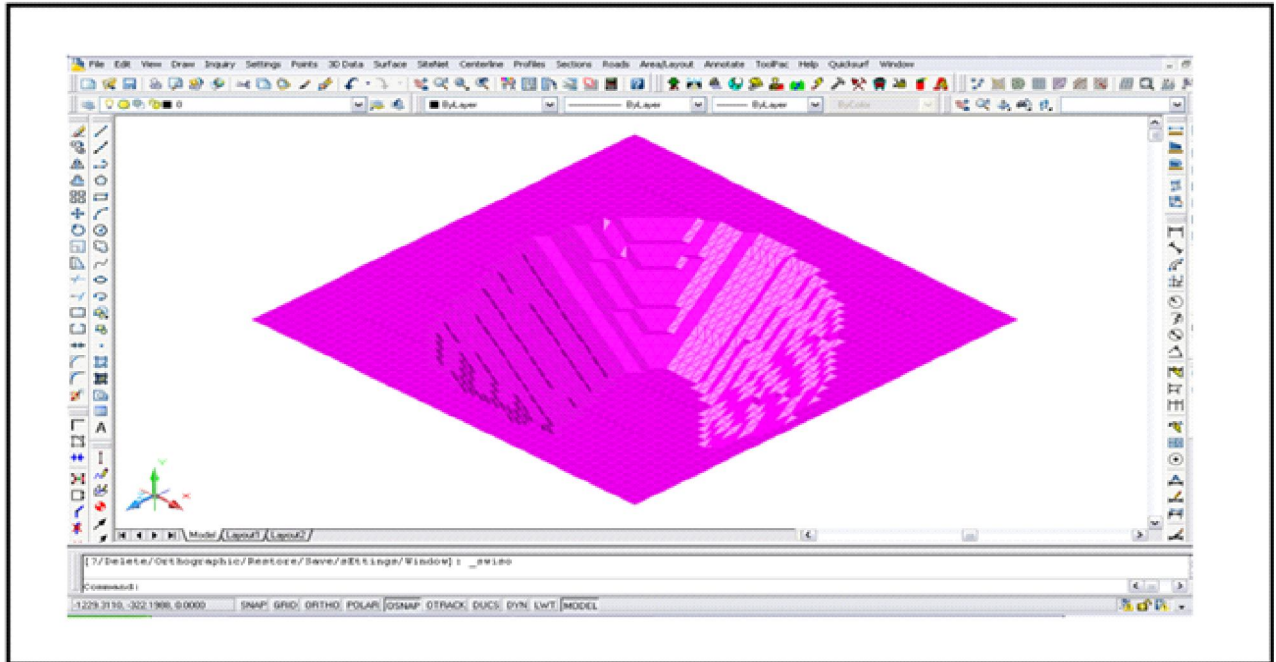


Figura 4. PIT final, Cono Flotante usando UPL; datos exportados a Autocad.

Los resultados de la optimización obtenidos mediante UPL, se presentan a continuación en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Datos arrojados por la macro UPL para el algoritmo de Lerchs-Grossmann

Lerchs-Grossmann UPL	
Bloques Útiles	8513
VPN (COP)	\$134.063.653.616

Tabla 2. Datos arrojados por la macro UPL para el algoritmo del cono flotante.

Cono flotante UPL	
Bloques Útiles	7820
VPN (COP)	\$93.532.092.326

4.2. Surpac vision

La información del modelo geológico mencionado anteriormente se llevo a un modelo de bloques en SURPAC y se utilizaron los algoritmos de Lerchs-Grossmann y cono flotante para buscar el pit óptimo mediante cada uno de estos.

Se usaron los mismos parámetros económicos y técnicos usados en UPL. Adicionalmente se utiliza un parámetro de encogimiento para los bloques (shrinkage) cercano a cero: 0.05, con esto se busca que las paredes estén escalonadas con el tamaño de bloque igualando los resultados con los obtenidos mediante UPL.

Los resultados obtenidos para las optimizaciones mediante Lerchs-Grossman y cono flotante son presentados a continuación en las tablas 3 y 4, y figuras 5 y 6.

Tabla 3. Datos arrojados por el programa SURPAC para el algoritmo de Lerchs-Grossmann

Lerchs-Grossmann	
Bloques Útiles	8567
VPN (COP)	\$133.063.972.492

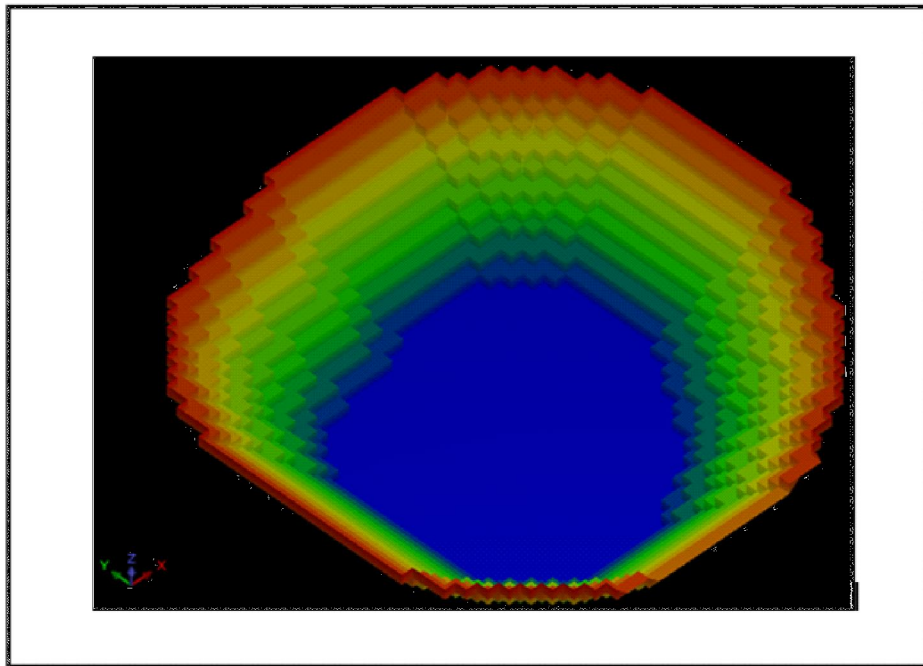


Figura 5. Pit óptimo Lerchs-Grossmann usando SURPAC.

Tabla 4. Datos arrojados por el programa SURPAC para el algoritmo de Cono Flotante

Cono Flotante	
Bloques útiles	8364
VPN -(COP)	\$133.063.972.492

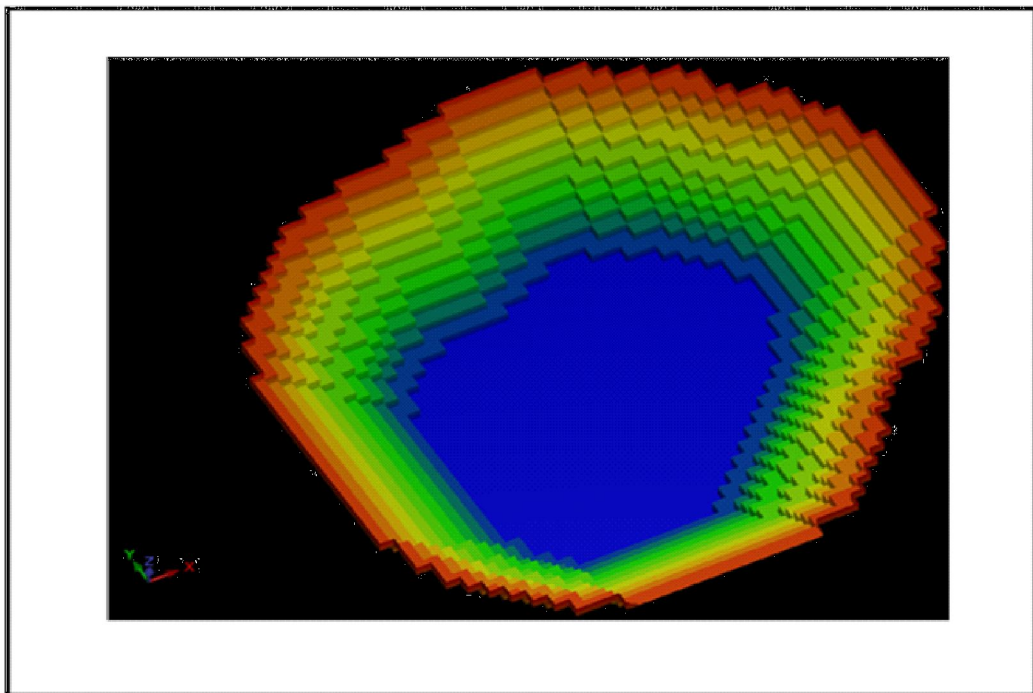


Figura 6. PIT Óptimo Cono Flotante usando SURPAC VISION.

4.3. Comparación de resultados

Se comparan los resultados obtenidos con SURPAC y UPL para cada algoritmo, comparando el número de bloques útiles y el valor del pit. Teniendo en cuenta las siguientes definiciones:

Bloques Útiles: Número de bloques con contenido mineral que quedaron dentro del pit óptimo.

VPN: Valor presente neto obtenido en el caso de minar o extraer el depósito de acuerdo con la optimización en pesos colombianos, también puede definirse como Valor del pit.

A continuación se muestran en las tablas 5 y 6 los resultados con estos parámetros para cada algoritmo y programa.

Tabla 5. Comparación de resultados arrojados por el programa UPL y SURPAC para el algoritmo de Lerchs-Grossman

Parámetros	Lerchs-Grossman		
	UPL	Surpac	% Diferencia
Bloques útiles	8513	8567	0,63
VPN	\$134.063.653.616	\$133.063.972.492	0,75

Para el algoritmo de Lerchs-Grossman las diferencias de resultados cuantitativos entre los dos programas de optimización usados son mínimas, lo cual nos permite inferir que aunque existan diferencias gráficas, la solución óptima a este problema de diseño mediante la aplicación de este método, no deberá diferir en gran medida de los resultados obtenidos por cada programa.

Adicionalmente, el método de UPL para el algoritmo de Lerchs-Grossman no garantiza los ángulos de las paredes del pit en sentido N-S, debido a que el programa evalúa cada perfil en el sentido E-W, y luego superpone los perfiles para formar el pit óptimo, esto se puede apreciar en la figura 7.(a)

En el sentido E-W el resultado gráfico obtenido con UPL se asemeja mucho al resultado arrojado por SURPAC, tal como se ve en la figura 7.(b)

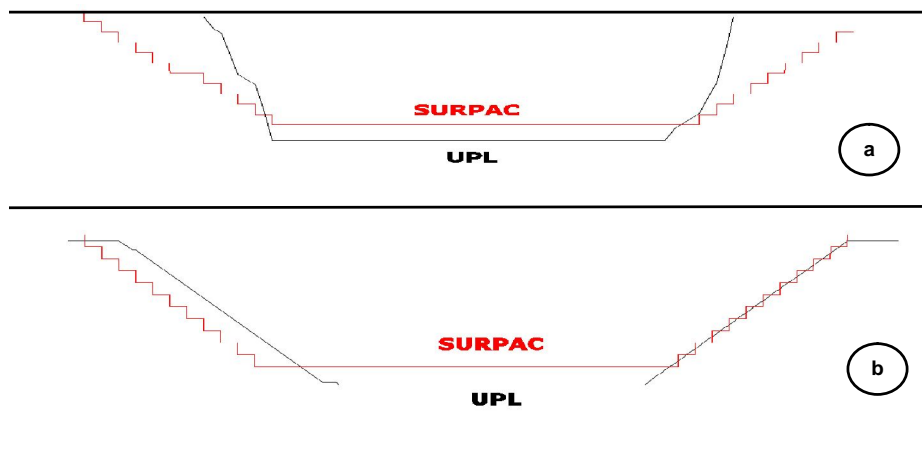


Figura 7: Perfil N-S (a) y E-W (b); pit óptimo Lerchs-Grossmann: Surpac vs UPL

Tabla 6. Comparación de resultados arrojados por el programa UPL y SURPAC para el algoritmo de cono flotante.

Parámetros	Cono flotante		
	UPL	Surpac	% Diferencia
Bloques útiles	7820	8364	6,50
Valor del pit	\$93.532.092.326	\$133.063.972.492	29,71

Para el algoritmo del cono flotante se observa que aunque el número de bloques útiles son cantidades cercanas si tomamos en cuenta son 32.500 el número de bloques que ingresan a la optimización en el valor del pit existe una notoria diferencia entre los dos programas ya que no se garantiza que la distribución de los bloques útiles sea la misma en cada método.

El algoritmo del cono flotante limita a que la forma del pit conserve siempre la forma de un cono invertido garantizando el ángulo de pared en todos los sentidos por tanto, la geometría final de pit óptimo generada por SURPAC y UPL son muy similares, esto se evidencia en la figura 8.

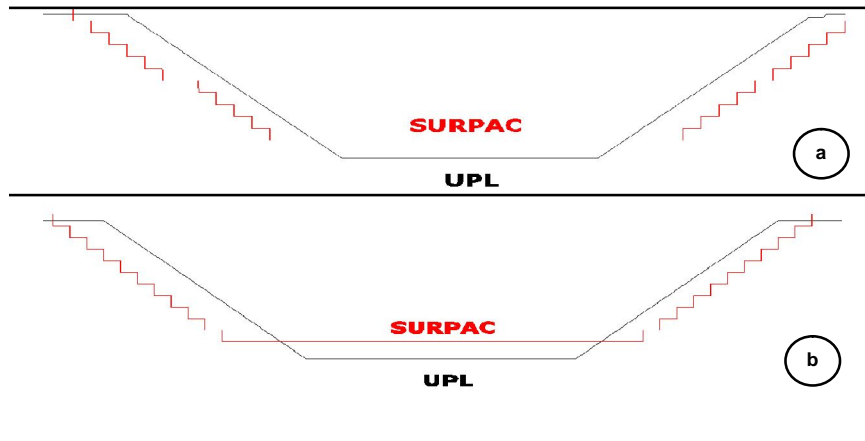


Figura 8: Perfil N-S (a) y E-W (b); Pit cono flotante Surpac vs UPL

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones a las que se llega luego de realizar el proceso descrito en este artículo y analizar los principales resultados.

- A. En el caso en el cual el único problema a resolver sea el de definición de los límites finales de la operación minera mediante el método de open pit, el uso de la macro UPL para ejecutar un proceso de optimización es válida, pero el proceso de optimización deberá ser ejecutado por una persona calificada que tenga criterio para aceptar o rechazar el resultado obtenido, pues como se puede apreciar en los resultados este puede no ser el óptimo.
- B. La macro UPL muestra mejor desempeño en cuanto a resultados cuantitativos, cuando es aplicada con el algoritmo de Lerchs-Grossmann debido a que este método es menos restrictivo que el algoritmo del cono flotante. Los resultados arrojados por Surpac y UPL difieren en menos del 1% en número de bloques útiles y valor del pit, demostrando la potencia del algoritmo independiente de la complejidad del programa que lo ejecute.
- C. El método del cono flotante aunque es relativamente fácil de comprender y aplicar también es bastante rígido en sus resultados, es decir, tiene un nivel de flexibilidad muy bajo, no funciona adecuadamente en geologías con distribuciones físicas y/o químicas irregulares representadas en los valores de los bloques.
- D. Los procesos de optimización realizados en Surpac, aunque hayan sido desarrollados por métodos diferentes y entreguen configuraciones de pit distintas dan una ganancia final igual, esto sugiere que este es el valor óptimo máximo a obtener con este modelo de bloques y los parámetros económicos y técnicos usados.
- E. Surpac permite al usuario definir el número de interacciones a realizar, a diferencia del UPL el cual las trae por defecto lo que permite asegurar que los resultados arrojados por Surpac son de mayor confiabilidad en el caso del cono flotante donde la diferencia de bloques útiles respecto a UPL fue de alrededor del 7% y el valor del pit del 30%.

F. Aunque los métodos aquí expuestos pueden ser aplicados de forma manual, este proceso puede convertirse en algo muy complejo y largo, en especial al momento de unir las secciones sobre las que se trabaja, por ejemplo se observa que en los perfiles presentados para Lerchs-Grossmann obtenidos con UPL, se verá que la superposición de estos perfiles no es algo exacto y que los resultados pueden ser poco operacionales considerando restricciones de geotecnia, logística, operación, etc. Por tal razón han de ser suavizados manualmente, lo que no garantiza el valor de pit inicial obtenido.

6. BIBLIOGRAFÍA

Drew, D. 2000. UPL (Ultimate Pit Limit). [En Línea]. (Consulta 10 de marzo 2010). Disponible en internet: <<http://www.hydrowash.com.au/david/upl/> >

GEMCOM WITTLE. Gemcom. [En línea]. (Consulta 1 marzo 2010). Disponible en internet: <<http://www.gemcomsoftware.com/products/whittle/> >

Hartman, H.L. 1992. SME mining engineering handbook. Society for mining, metallurgy and exploration. Vol 2. Littleton, Colorado.

Lerchs, H. and Grossmann, I. 1965. Optimum desing of open pit mines. CIM Bulletin 58. pp47-54

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) [En Línea]. Resolución No. 0818. 28 de Diciembre de 2009. (Consulta 28 de Abril 2010). Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/Normatividad/SIMCO/0818_2009.pdf

