

# Estudio de Perfil para Incorporar los Conceptos de “Taludes Desacoplados” y “Expansiones Inclinadas” en la Planificación Largo Plazo de Minas Cielo Abierto de gran Profundidad.

Eduardo O. Latorre <sup>1</sup>

## Resumen

El presente estudio, intenta evaluar la conveniencia de iniciar estudios detallados de diseño geotécnico para implementar los conceptos de Taludes Desacoplados y Expansiones Inclinadas, como una alternativa viable de explotación en la gran minería Cielo Abierto. Para esto, se realizó un estudio conceptual de los diseños, se planificó una secuencia de explotación y se elaboró un plan minero, el que finalmente permitió hacer un estudio económico a nivel de perfil, arrojando resultados que fueron comparados con el Caso Base de la Empresa. Este estudio arrojó un VAN de MUS\$ 90 por sobre el Caso Base, lo cual permite concluir que es necesario invertir en un estudio más acabado.

## Resumen

This paper tries to evaluate the convenience when a staff begins to analyze detailed geotechnical design studies to implement the Slip Slopes and Incline Pushbacks concepts as an alternative in the open pit mine design. To get this objective, a design conceptual study and scheduling and mining sequence were done. Finally, an economic study was obtained where its results were compared with company's Case Base. The new NPV is about MUS\$ 90 over company's one. As a general conclusion, it is necessary to invest in a more detailed study.

## I INTRODUCCIÓN

En general, las empresas mineras que explotan minas a Cielo Abierto de grandes dimensiones y que ya están cercanas al final de su vida útil, ven un incremento en la inseguridad y los costos de las operaciones, y la imposibilidad de alcanzar mayores reservas, por lo que comienzan a pensar en el abandono o en la continuación de la explotación con métodos subterráneos, dependiendo de las características del yacimiento. Con esta última alternativa, la cual puede ser rentable, las utilidades alcanzadas son menores que en la explotación a Cielo Abierto y, por lo tanto, se debe hacer un esfuerzo por prolongar la Explotación Abierta. Es en esta búsqueda de nuevas alternativas que han surgido los conceptos de Taludes desacoplados y Expansiones Inclinadas, los que trataremos de explicar muy simplemente, en las siguientes líneas.

## II OBJETIVOS Y ALCANCES

El presente estudio, a nivel de perfil, intenta evaluar la conveniencia de iniciar un estudio acabado sobre las posibilidades geotécnicas de aplicar Taludes Desacoplados y Expansiones Inclinadas en la Explotación a Largo Plazo de una Mina a Cielo Abierto de gran profundidad.

Para realizar este estudio se utilizaron parámetros técnico económicos de Mina Chuquicamata de Codelco Chile, a los que se le aplicaron factores que permiten proteger información estratégica, pero que de ninguna forma alteran los resultados finales. Es importante aclarar, que las características geomecánicas de las rocas que forman el Macizo Rocosco deben permitir este tipo de diseños, pues de otra forma no tiene sentido seguir con estudios más detallados.

**Palabras Claves:** Minería, Diseño, Evaluación

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile. [Elatorre@plata.uda.cl](mailto:Elatorre@plata.uda.cl)

### III ASPECTOS GEOTÉCNICOS

En general, se reconocen dos sectores geotécnicos mayores, separados por la Falla Oeste y desarrollados en ambientes litológicos distintos. Estos corresponden al Talud Oeste y al Talud Este.

En el Talud Oeste se reconoce un macizo rocoso de mala calidad geotécnica (Bieniawski 1976) asociada principalmente a la Zona de Cizalle de la Falla Oeste, mientras que en el Talud Este estas rocas de mala calidad se asocian a rasgos de litología-alteración, tales como: roca Cuarzo-Sericita, Metasedimentos, Pórfido Este con alteración sericítica moderada.

Los arreglos estructurales reconocidos en Mina Chuquicamata han permitido definir ocho dominios estructurales mayores, dos en el Talud Oeste y seis en el Talud Este.

De acuerdo a los estudios realizados, fue posible determinar los mecanismos de fallamientos más frecuentes en cada uno de los sectores geotécnicos mayores: volcamientos y deslizamientos planares para el Talud Oeste y preferentemente cuñas y fallamiento planar en el Talud Este.

### IV SITUACIÓN ACTUAL

#### 4.1 Esquema de explotación

Actualmente el Rajo Chuquicamata opera con un Esquema de Explotación Cerrado, cuya principal característica es la imposibilidad de acceder a los bancos que no están en explotación, debido principalmente a que la berma de banco disminuye y la rampa se cierra, haciéndose continua. La altura de banco varía de 12 a 30 metros, el ancho de la rampa es de 30 mts y su pendiente varía de 9 a 10%; el ancho mínimo de fondo es de 50mts.

El talud global es del tipo Continuo, es decir, los bancos de contención (catch bench) no son de gran anchura (40mts en el Oeste y 30 mts en el Este). Su valor varía de 30° a 43°. Los ángulos inter-rampa varían de 32° a 46°.

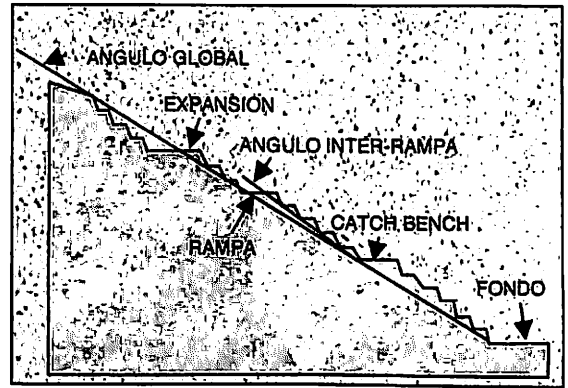


Fig N°1: Esquema de Talud Continuo.

Finalmente, el avance de la explotación se desarrolla a través de expansiones que podríamos denominar Tradicionales, debido a que avanzan desarrollando los bancos en forma horizontal. Sus dimensiones son en promedio de 120 metros de ancho por 900 de largo.

El esquema actual de explotación trae consigo los siguientes problemas:

- No es posible explotar más de dos bancos a la vez. Esto hace que la expansión demore en promedio, cuatro años en alcanzar mineral en el sector Este y seis años en el Oeste, mineral que solo cubrirá 1,5 años de producción. Es por la misma razón también, que las expansiones no pueden ser de mayor tamaño.
- Las dimensiones actuales permiten el emplazamiento de a lo más 2 palas por expansión, por lo que para generar un plan minero flexible y de moderado riesgo, es necesario contar con alrededor de 5 a 6 expansiones en desarrollo.
- Otro efecto del tamaño de las expansiones, es que el tamaño del fondo que abre, es pequeño, y en general no se adapta a la forma y dimensión del yacimiento.
- El talud Global ha alcanzado su máximo ángulo, lo que impide diseñar un pit final más profundo que permita aumentar las reservas.

- El Talud Continuo a máximo ángulo provoca un aumento de la inestabilidad y, por lo tanto, aumenta las probabilidades de que se interrumpa el proceso productivo de la mina si llegase a suceder un fallamiento global. El problema es mayor al considerar que la pared Oeste cuenta con una zona de cizalle altamente plástica.

Todos estos problemas se traducen en la imposibilidad de mantener asegurada la continuidad de la producción y, por otro lado, no permite incrementar las utilidades del negocio.

#### 4.2 Reservas

En función de las características económicas y de diseño del pit final de mina Chuquicamata, se llega a determinar que las reservas minables para una ley de corte de 0,45 % de Cu son las de las siguientes características:

**Tabla 1. Reservas minables**

Item	Caso Base
MATERIAL (Kton)	4.855.529
LASTRE (Kton)	3.508.472
MINERAL (Kton)	1.347.057
LEY MEDIA CuT (%)	0,880
LEY MEDIA Mo (%)	0,038
RAZÓN L/M	2,605

### V ESTUDIO CONCEPTUAL

#### 5.1 Taludes Desacoplados

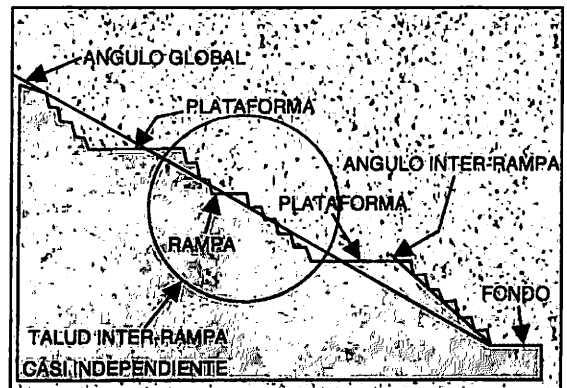
Para resolver parte de los problemas asociados al gigantismo de Chuquicamata, los cuales impiden la profundización en forma segura, se estudió la posibilidad de aplicar Taludes Desacoplados.

Este concepto se define como el desacople de los taludes mediante grandes plataformas, es decir, dividir un gran talud en varios taludes de menor altura, mediante los cuales se puedan controlar de una forma más adecuada, los problemas de

estabilidad que se generen.

Cada uno de estos taludes inter-rampa son geomecánicamente casi independientes. Por un lado, su peso influye en los taludes inferiores y, por otro, sus inestabilidades no deberían afectar a otros, sino que sólo a los sectores asociados al talud inter-rampa afectado.

Para lograr incorporar este esquema y provocar un efecto positivo en la planificación y la rentabilidad del negocio, los parámetros de diseño geotécnico deben ser modificados. Sin embargo, se sabe que no es posible aumentar más los ángulos globales de la mina pues ellos han sido determinados en función de las características de la roca, las cuales son invariables. No obstante, existe la posibilidad de aumentar dicho ángulo, y ello se fundamenta en el aumento de la probabilidad de fallamiento. Este incremento del ángulo inter-rampa permitirá compensar el efecto de las plataformas.



**Fig. N°2: Esquema de Taludes Desacoplados.**

Las variaciones extremas de los parámetros de diseño de banco, para generar la discontinuidad, son:

- Un ángulo de banco ( $\delta$ ) mayor.
- Una altura de banco ( $h$ ) mayor.
- Un ancho de la berma de banco ( $b$ ) menor.

Los dos primeros parámetros son más difíciles de modificar, debido a que el ángulo de banco depende

de los parámetros estructurales y geomecánicos de la roca, y la altura de banco depende tanto de esos parámetros como de las dimensiones de los equipos de carguío, entre otros. Sin embargo, la berma de banco puede ser más fácil de modificar, debido a dos razones: se trabaja con un sistema de explotación cerrado y, por otra parte, el porcentaje de retención de los posibles derrames de banco se puede disminuir.

Estas características permiten aumentar el ángulo inter-rampa ( $\beta$ ), el cual se opondrá al efecto de las plataformas.

Pero, ¿cuánto debe aumentarse dicho ángulo?, lo suficiente para sobrepasar la disminución generada por las plataformas. De esta manera, se asegura un aumento del ángulo global ( $\alpha$ ), lo cual puede dar como resultado una de las siguientes alternativas:

- Se disminuye la cantidad de estéril a remover.
- Se aumentan las reservas de mineral.
- Se produce un efecto mixto.

Ante lo expuesto hasta ahora, cabe preguntarse ¿es posible aumentar el ángulo inter-rampa y mantener un nivel de seguridad adecuado?. Para contestarla, basta con usar un método que utilice parámetros geotécnicos básicos para el cálculo de Factores de Seguridad, tal como los Abacos de Hoek, que si bien quedaron obsoletos al aparecer una serie de programas computacionales, es rápido y bastante acertado cuando se trata de estudios a nivel de perfil. De acuerdo a los principales parámetros geotécnicos de Mina Chuquicamata (ángulo interno de fricción y cohesión), se logró determinar los siguientes parámetros de diseño:

**Tabla 2.** Parámetros de diseño-taludes desacoplados.

ITEM	PARED OESTE	PARED ESTE
Factor de Seguridad	1,87	1,94
Altura talud Inter-rampa	320 m	320 m
Ancho de Plataforma	100 m	60 m
Angulo Inter-rampa	43°	52°
Angulo talud de banco	60°	75°
Altura de banco	12, 13, 15 y 18 m	
Angulo Global	35,39°	45,03°

Estos últimos valores indican un incremento del ángulo de talud global equivalente a 3,39° en el Oeste y 2,03° en el Este.

Para mejorar la operación, las plataformas podrían dejarse inclinadas, de tal forma que tomen el lugar de las rampas principales del rajo y, de esta forma, ayuden a mejorar el manejo de materiales. Esta claro que rampas con 100 o 60 metros de ancho, permitirán la instalación de cualquier sistema de transporte, e incluso podrían idearse nuevos sistemas.

## 5.2 Expansiones Inclinadas

Las ideas expuestas anteriormente resuelven el problema de la profundización, pero generan otro problema muy importante. Los taludes desacoplados tienen el inconveniente de que para su construcción, es necesario remover una gran cantidad de estéril en los inicios de las expansiones. Esa es la única forma de que posteriormente puedan dar cabida a las plataformas. Esto significa una demora en alcanzar mineral, un aumento de la razón lastre mineral y una disminución de las utilidades del negocio en el corto y mediano plazo.

Para resolver el problema se ha ideado el concepto de Expansiones Inclinadas.

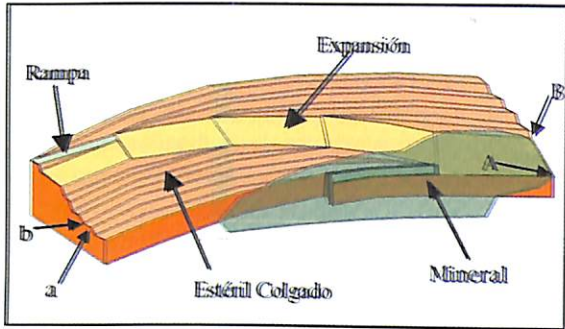
Estas expansiones se construyen como si fueran una gran rampa dirigida hacia el mineral, tal como lo muestra la figura N°3.

La Expansión Inclinada, dejará estéril colgado en su primera etapa, y ese estéril es el que contrarrestará el exceso producido por los Taludes Desacoplados.

En la figura N°3, los puntos "A" y "a" corresponden a la cresta del mismo banco, mientras que los puntos "B" y "b", a las patas del banco inmediatamente superior.

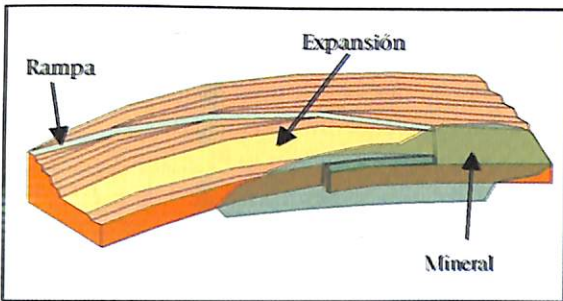
La distancia entre los puntos "A" y "B" es el ancho de la expansión y se produce porque al avanzar la explotación, el punto B retrocede, tal y como sucede con las expansiones tradicionales. Sin embargo, al otro lado de la expansión no hay avance.

por lo que el estéril queda colgado; luego, el punto "b" no retrocede.



**Figura N°3:** Expansión Inclinada en su primera etapa de desarrollo.

Una vez que la expansión este por alcanzar mineral, se iniciará la segunda etapa del avance, que consistirá en extraer el estéril colgado, para dejar la expansión de la forma tradicional, tal como lo muestra la figura N° 4.



**Fig. N°4:** Expansión Inclinada después de finalizar la segunda etapa de explotación.

Cabe destacar, que el diseño y la planificación de la producción con este tipo de expansiones es muy complicada y debe realizarse muy detalladamente. Se debe considerar que una vez explotado todo el mineral despejado por la expansión, el estéril colgado ya debe haber sido extraído. De no ser así, la expansión quedará imposibilitada de seguir avanzando, lo que provocará una demora de alto costo.

Al quedar la Expansión Inclinada como una tradicional, se puede tomar una de las siguientes decisiones:

- Seguir la explotación tradicional.
- Volver a inclinar la expansión.

Todo dependerá de la distribución de leyes al interior del yacimiento. Si existe un sector de alta ley, podría resultar beneficioso alcanzar esas reservas y postergar otras de más baja ley. Esto generará un efecto financiero positivo en el flujo de mediano plazo.

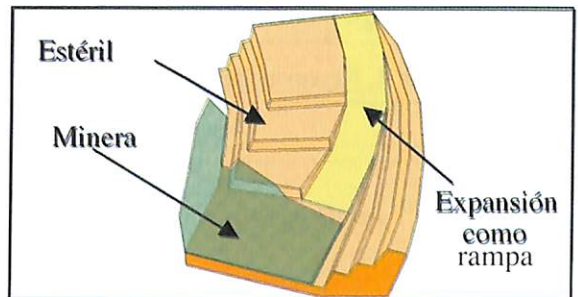
Otras consideraciones que se deben tomar en cuenta son las siguientes.

Las dimensiones de las expansiones deberán ser tal, que permitan despejar mineral, al inclinar por lo menos tres cuartos de si misma.

La expansión no se desarrollará siempre inclinada, solo en aquellos sectores que sea posible adelantar mineral. Esto porque, lo más probable es que en los inicios de una expansión, la inclinación de la misma no permita despejar mineral en forma inmediata, por lo que será necesario alcanzar un cierto nivel de profundidad antes de inclinarla.

Una expansión inclinada es como una gran rampa, por lo que se debe poner especial atención a los métodos de construcción de las mismas. Construir una rampa tradicional no es fácil, debido a que normalmente los equipos de carguío utilizados para tal efecto son los Cargadores Frontales, los cuales tienen un alto costo de operación. Para resolver el problema, se ha pensado hasta ahora en dos soluciones:

- Acondicionar una pala, de tal forma que al trabajar en pendiente no se desgasten las piezas del eje principal por efecto de la gravedad, o
- No construir la expansión inclinada a todo su ancho, sino que dejar una especie de rampa empotrada, tal como lo muestra la figura N° 5.



**Figura N° 5:** Variante de una Expansión Inclinada

## VI DISEÑO Y PLANIFICACION MINERA

### 6.1 Diseño

Los parámetros de diseño del Pit Final como de las expansiones, se basan en los estudios conceptuales anteriores y en las expresiones tradicionales que definen, dimensiones de rampas, canchas de aculatamiento, bermas de seguridad, y dimensiones de expansiones entre otros (Tabla 3); todos de acuerdo a las dimensiones de los equipos más grandes de la Mina, Palas de 56yd3 y camiones de 320 tc.

**Tabla 3.** Principales parámetros de diseño.

	Talud Oeste	Talud Este
Ancho de rampa (m)	31	31
Ancho min carguío (m)	63	63
Altura de baco (m)	15	15
Ancho expansión (m)	159	155
Largo expansión (m)	1613	1613

### 6.2 Pit Final y reservas minables

El Pit Final se define en función del Modelo de Bloques del yacimiento, de parámetros de diseño básicos como ángulos de talud y alturas de banco, entre otros, y de parámetros económicos, los cuales se ingresan al programa de optimización.

Con el método del Cono Flotante Optimizado, incluido en el Módulo de Optimización de Rajos de MEDSYSTEM®, se determinó el Cono óptimo para un beneficio igual a cero, el cual después de suavizado, pasó a ser el Pit Final de la mina.

Una vez generado el Pit Final, se ingresa a los módulos de cubicación de MEDSYSTEM®, y se obtienen las reservas del proyecto para una ley de corte de 0,45% Cu.

**Tabla 4. Reservas del Proyecto**

Item	Valor
Material (Kton)	5.606.831
Lastre (Kton)	4.068.471
Mineral (Kton)	1.538.360
Ley de CuT (%)	0,861
Ley de Mo (%)	0,037
Razón L/M	2,64

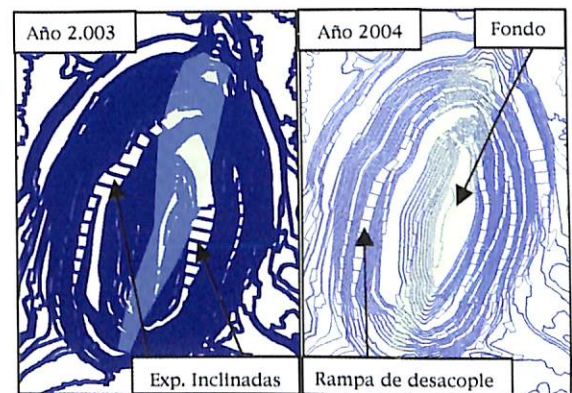
A pesar de que el lastre y la razón lastre/mineral aumentaron y la ley media de cobre disminuyó, las reservas de mineral aumentaron y, por lo tanto, cabe la esperanza de que con una evaluación más rigurosa se logren mejores resultados en el largo plazo.

Para determinar la influencia de los conceptos en el mediano plazo, se debe diseñar, simular y cubicar la secuencia de explotación de los primeros años.

### 6.3 Diseño de expansiones y secuencia de explotación

Las expansiones se diseñaron en el software minero MEDSYSTEM®, y para ello, se consideraron todos los parámetros de diseño estudiados en el análisis conceptual, la topografía actualizada, la ubicación de las expansiones tradicionales actualmente en operación y la disposición espacial de la mineralización (Modelo de Bloques), con sus respectivos rangos de leyes.

La figura 6, muestra la disposición de las expansiones inclinadas principales y como ellas alcanzan mineral al estar inclinadas.



**Fig N°6:** Expansiones inclinadas.

La secuencia de explotación considera la unión de cuatro de las actuales expansiones tradicionales que están recién iniciando su explotación, para formar dos expansiones inclinadas, y la creación de una tercera. Con estas tres expansiones inclinadas, todas en estéril durante los primeros años, más las que están actualmente en mineral, se cubrió un periodo de nueve años de producción.

## 6.4 Plan Minero

Una vez definida la secuencia de explotación y definidos los diseños, se procedió a la cubicación de las expansiones por banco. Cada expansión tuvo dos cubicaciones independientes, una de la primera fase (Inclinación), y otra de la segunda fase (explotación de estéril colgado). Esta es la única forma de incluir el efecto de las expansiones inclinadas en el plan minero y en las fotos de cada año, tal como se muestra en la figura N°6.

Posteriormente, considerando la capacidad y secuencia de llenado de los botaderos, la productividad de los equipos de chancado (para mineral: 180 Kt/d de la estación E-4 y 60 Kt/d de la estación F-3, y para estéril: 120 Kt/d de la estación J-1) y las restricciones de la explotación (cantidad y calidad de impurezas, restricción de avance hacia sectores con instalaciones, etc), se confecciona el plan minero, que determina el movimiento de materiales de los primeros nueve años del proyecto, es decir, en el mediano plazo. La tabla que se presenta a continuación, muestra la principal información del plan minero.

**Tabla 5. Plan minero resumido**

Per	Mineral		Estéril	Material		Rel.
	kth/año	%CuT	kt	kt		kt/d
1	57.048	1,02	123.952	181.000	500	2,17
2	57.911	1,08	141.850	199.761	550	2,45
3	57.759	1,05	175.749	233.508	645	3,04
4	58.872	1,00	181.841	240.713	665	3,09
5	59.999	1,00	178.918	238.917	660	2,98
6	60.177	1,08	179.403	239.580	660	2,98
7	59.913	1,07	180.825	240.738	665	3,02
8	60.025	1,18	182.525	242.550	670	3,04
9	59.988	1,19	187.980	247.968	685	3,13
<b>Proy</b>	531.692	1,07	1.533.043	2.064.735		2,88
<b>Caso base</b>	531.785	1,01	1.366.480	1.898.265		2,57

## VII EVALUACIÓN ECONÓMICA

### 7.1 Evaluación del Plan Minero a mediano plazo

De acuerdo al plan minero, se definieron muy groseramente los equipos principales de la mina (camiones, palas, cargadores, aljibes, moto niveladoras, tractores, etc).

En función de esas inversiones, los costos de operación unitarios actuales y, considerando los precios promedios que la División utiliza para todos sus proyectos (1,05 US\$/lb para el Cobre y 8 US\$/Kg para el Molibdeno), se determinó la rentabilidad de éste en particular.

Los resultados de la evaluación antes de impuesto, para un tipo de cambio de 420 (\$/US\$) y una tasa de descuento del 10%, son los que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla N°6. Eval. económica plan de 9 años (KUS\$).**

Per.	Ingresos	Costos	Invers.	Flujo
1	928.109	495.679	93.173	339.257
2	1.030.146	480.696	113.103	436.347
3	970.606	496.082	63.591	410.933
4	900.124	479.347	186.065	234.712
5	889.173	455.408	20.449	413.316
6	957.422	486.066	52.503	418.853
7	975.375	519.939	9.115	446.321
8	1.096.610	553.157	39.368	504.085
9	1.078.467	553.963	10.415	514.089
<b>VAN</b>	2.313.369			
<b>IVAN</b>	5,47			

### 7.2 Evaluación a largo plazo

Sólo para complementar los resultados anteriores e incorporar mayor información al estudio, se realizó una extrapolación de los resultados para la vida útil

de la mina (25 años). En este nuevo contexto, el VAN del proyecto fue de MUS\$ 2.313 y el VAN alcanza a 5,47.

## VIII CONCLUSIONES

Del estudio antes descrito, se pueden extraer las siguientes conclusiones: a) el diseño actual de rajo final, con taludes continuos, ha alcanzado un límite de seguridad mínimo, por lo que no es posible seguir mejorando el negocio desde el punto de vista de la generación de nuevas reservas. b) los Taludes Desacoplados, logran un aumento del ángulo de talud global y de las reservas de mineral, sobre la base de una mayor probabilidad de fallamientos. c) las expansiones inclinadas, logran su objetivo principal, que es despejar mineral en la mitad del tiempo en que lo haría una tradicional; sin embargo, no logra contrarrestar el exceso provocado por los taludes desacoplados. d) no obstante lo anterior, las expansiones inclinadas permiten emplazar mayor cantidad de palas, adelantar mineral de mayor ley y disminuir la cantidad de rampas, y por ende, las distancias de transporte. e) en conjunto, Taludes y Expansiones, pueden mejorar el manejo de minerales, dado que es posible emplazar cualquier sistema de extracción, en rampas tan anchas como las descritas en este estudio. Se estima que los costos unitarios por este concepto

debieran disminuir significativamente. f) iniciar el diseño de taludes desacoplados con expansiones tradicionales, provocó la pérdida de mineral de buena calidad (años 4 y 5 del plan minero). Esto se debe a que no estaban preparadas para dar cabida a las plataformas. Las cubicaciones, si bien, muestran un aumento de las reservas, también se produce un aumento de la razón lastre/mineral. No obstante lo anterior, los ingresos marginales por fino producido, cubren los costos marginales y generan una utilidad bastante significativa, que para el caso de la evaluación a 9 años, asciende a un VAN de MUS\$ 2.313, lo que se traduce en un aumento de MUS\$ 76,7 sobre el Caso Base. g) si el flujo incremental lo extrapolamos a 25 años, la diferencia asciende a un VAN de MUS\$ 90. h) en este contexto, se recomienda el inicio de nuevos estudios que permitan definir con mayor certeza, los parámetros de diseño geotécnicos y nuevas formas de desarrollar expansiones inclinadas.

## IX AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a los señores Miguel Romero Casanova, entonces Ingeniero de Planificación de Codelco Chile División Chuquicamata, y a Mario Fribla Gonzalez, Profesor Asociado de la Universidad de Atacama, quienes aportaron ideas y consejos para orientar la materialización de este trabajo.