



VALORIZACIÓN DE LA INCORPORACIÓN DE LA VARIABLE DE CONSUMO DE AGUA EN EL MODELO DE BLOQUES

VALORIZATION OF THE INCORPORATION OF THE WATER CONSUMPTION VARIABLE IN THE MODEL OF BLOCKSINSTALLATION

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

ANDRÉS EDUARDO ESCARE RUMINOT

Dirigido por:

Dr. FRANCISCO JAVIER LILLO RAMOS

Alcalá de Henares, a 03 de Julio de 2019

AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de este trabajo quisiera agradecer a un grupo de personas que siempre me prestaron colaboración y consejos en cómo abordar la problemática planteada. Me refiero a los Ingenieros Civiles en Minas Ronald Guzmán, Jorge Contreras y José Valdivieso.

Es importante hacer mención a un grupo de geólogos que también cooperaron con su visión en este trabajo: Sr. Juan Carlos Roa y la Dra. María Delia Rodríguez.

A su vez, agradezco la oportunidad brindada por todos los docentes de este Máster, pues sin duda han repercutido en desarrollar de buena forma este hito académico en mi vida.

Por último, agradecer a mi familia por el apoyo entregado y el tiempo cedido para que pudiese avanzar con estos estudios y terminarlos de buena forma.

ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
2. Justificación y Objetivos.....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
2.3 Alcances del trabajo.....	3
3. Estado del Arte.....	4
4. Metodología.....	7
5. Resultados y Discusión	12
6. Conclusiones.....	25
7. Bibliografía.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origen, periodo 2018-2029.....	4
Figura 2. Consumo de agua de mar según tipo de proceso en la minería del cobre, período 2018-2029.....	5
Figura 3. Resumen de metodología de evaluación económica.....	9
Figura 4. VAN unitario de cada bloque que compone el modelo de bloques de la mina “El Roble” sin la variable agua.....	13
Figura 5. Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” sin la variable agua	13
Figura 6. VAN unitario de cada bloque que compone del modelo de bloques de la mina “El Roble” con la variable agua desalinizada incorporada.....	14
Figura 7. Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” con la variable agua desalinizada.....	15
Figura 8. VAN unitario de cada bloque que compone del modelo de bloques de la mina “El Roble” con la variable agua fresca incorporada.....	16
Figura 9. Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” con la variable agua fresca.....	16
Figura 10. Comparación de VAN > 0 unitarios de bloques con y sin la variable agua..	17
Figura 11. Comparación de VAN < 0 unitarios de bloques con y sin la variable agua..	18
Figura 12. Perfil longitudinal Norte 440 de Altura de bloques sin la variable agua y con la variable agua desalinizada	19
Figura 13. Perfil Longitudinal Este 500 de Altura de bloques sin la variable agua y con la variable agua desalinizada.....	19

Figura 14. Comparación VAN > 0 unitarios de bloques sin la variable agua y con la variable agua fresca.....	20
Figura 15. Comparación de VAN < 0 unitarios de bloques sin la variable agua y con la variable agua fresca	21
Figura 16. Perfil Longitudinal Norte 440 de Altura de bloques sin la variable agua y con la variable agua fresca	21
Figura 17. Perfil Longitudinal Este 500, de Altura de bloques sin la variable agua y con la variable agua fresca	22

TABLA DE ABREVIATURAS

MUS\$: Millones de dólares.

T: Tonelaje total (t).

Ley: Ley de Cobre Total (%).

P_{CU}: Precio de la libra de cobre (US\$/lb).

D_{CU}: Descuento por venta a concentrado en (US\$/lb).

Rec: Recuperación metalúrgica.

C_M: Costo Mina en (US\$/t).

C_P: Costo Planta en (US\$/t).

C_R: Rentabilidad mínima exigida por tonelada explotada en (US\$/t).

A: Área de punto de extracción.

C_{Prep}: Costo de preparación de punto de extracción.

C_w: Costo del agua (US\$).

P_w: Precio del agua por metro cúbico (US\$/m³).

RESUMEN

El agua junto con ser un recurso vital para los humanos, también lo es para la minería. En Chile, las distintas compañías mineras están contemplando el uso de este recurso extraído desde el mar, lo que trae consigo el proceso de desalinización y, por ende, mayores costos en el procesamiento mineral de sus yacimientos. A su vez, los proyectos mineros no contemplan en sus planes mineros esta variable en los inicios de proyectos lo que genera un efecto de rentabilidad poco real con respecto a la incorporación de este recurso en etapas más avanzadas del proyecto. Es por ello que este trabajo contempla una metodología de incorporación de la variable agua en el modelo bloques lo que permite comparar en un estado inicial (sin agua) y estado final (con agua) las resultantes de dicha incorporación.

En este estudio se evaluó el modelo de bloques de la mina “El Roble” en distintos escenarios. Los resultados entregaron bajas significativas con respecto a la valorización inicial llegando a afectar hasta un -31,4% el VAN equivalente a menos MUS\$864 del proyecto. Además, se apreció una merma de zonas que inicialmente se habían catalogadas de productivas a zonas sin potencial económico de acuerdo a este balance monetario.

Los beneficios de éste método es la posibilidad de cuantificar de forma fidedigna a la realidad el impacto económico que contienen incorporar el modelo desde sus inicios y de esta forma no subestimar el costo del agua y su impacto en el procesamiento mineral.

1. INTRODUCCIÓN

Un elemento esencial en la estimación de recursos mineros es el modelo de bloques, que es la representación tridimensional de los recursos y reservas del yacimiento, el cual se subdivide en pequeños bloques caracterizados geológicamente con atributos como leyes de minerales, unidades litológicas, tipo de mineral, categorización, etc. (Contreras, 2016). Todos ellos permiten realizar una estimación a partir de diferentes métodos disponibles para ello. Esta estimación permite cuantificar recursos y así definir envolventes económicas las cuales nos entregarán VAN óptimo para definir la vida del proyecto.

Por otra parte, en Chile el rápido crecimiento de la industria minera ha generado una explosiva demanda de agua y energía. Esto ha llevado a tomar la decisión de capturar agua de mar la que requiere altos costos en energía para desalar y bombear agua desde la costa hacia las faenas (ICMM, 2012). Por ende, el consumo de agua conlleva un alto costo en el procesamiento mineral, pues es un bien escaso que sólo es considerado dentro de la ecuación en etapas finales de estudios de factibilidad en la forma de gastos y costos operacionales de un proyecto minero.

Este trabajo busca integrar en el proceso de valorización de recursos y reservas la incorporación de la variable agua desde los inicios de un proyecto minero. Con ello, se podrá dimensionar el impacto económico que tiene el agua en la valorización lo que permite acercarse a la realidad desde etapas tempranas del proyecto.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La estimación de reservas se preocupa casi exclusivamente de la evaluación y gestión del riesgo asociado a las leyes de mineral y parámetros geológicos (Li *et al.*, 2004) lo que denota la ausencia de la variable de consumo de agua en dichas estimaciones. Es por ello, que el presente estudio propone incorporar la variable del consumo de agua en el modelo de bloques. Esto permitiría estimar dicho consumo desde etapas primarias de un proyecto minero, lo que se acerca de manera fidedigna a la realidad que son los costos asociados al futuro avance del proyecto minero.

2.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es incorporar y contabilizar en la valorización el parámetro del consumo de agua en el modelo de bloques de un proyecto minero.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Desarrollar una metodología de incorporación del consumo de agua y
- b) Valorizar un modelo de bloques con y sin la variable de consumo de agua para evaluar el impacto que tiene esta variable en el VAN del proyecto.

2.3 Alcances del trabajo

Este trabajo considerará el agua fresca (agua continental) y el agua de mar que es la tendencia de la gran minería del cobre en Chile. En los análisis y valorizaciones no se considerará la recirculación del recurso hídrico en el sistema para realizar la valorización de los respectivos modelos de bloques.

3. ESTADO DEL ARTE

a) Consumo de agua en minería

El agua es imprescindible en los procesos mineros y hay factores como la caída en las leyes que hacen aumentar su consumo (Consejo Minero, 2015).

Todos los años la Corporación Chilena del Cobre (Cochilco) emite un informe actualizado acerca del consumo de agua en la minería del cobre.

Actualmente en la gran minería del cobre en Chile, el consumo de agua predominantemente proviene de aguas continentales. Sin embargo, la escasez de los recursos hídricos, la proyección, estabilidad y sustentabilidad del negocio minero hace a las grandes compañías volcar sus esfuerzos a la construcción de plantas desalinizadoras que permita abastecer de este recurso a sus procesos extractivos.

Cochilco (2018), estima que el consumo de agua de mar será de un 43% con respecto al agua total utilizada en la industria minera (Figura 1). En caso de que la factibilidad técnica y económica lo permita se estimó que se podría alcanzar a los 10,82 m³/s (341,22 hm³/año) en el año 2029, lo que corresponde a un incremento de un 230% respecto al valor esperado para el 2018. Esto se explica por el cambio del tipo de mineral a extraer, siendo predominantemente sulfuros los que requieren abundante agua para el proceso de flotación.

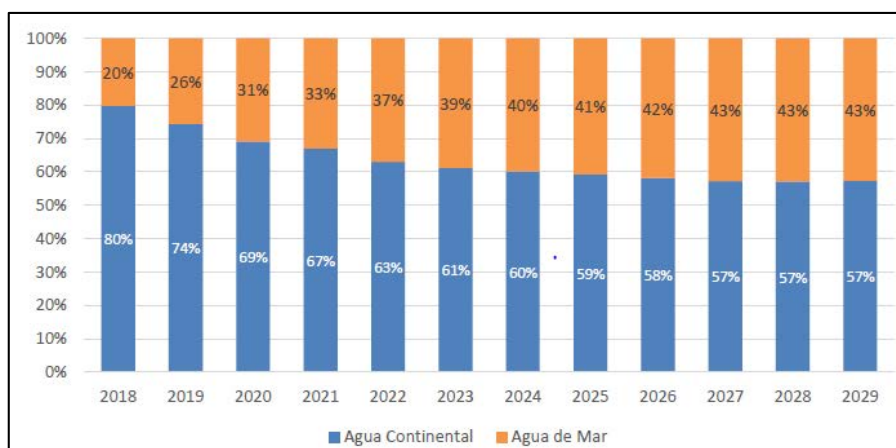


Figura 1: Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origen, periodo 2018-2029 (Cochilco, 2018).

Para el 2029, se espera que más de un 86% del agua marina sea utilizada al procesamiento de sulfuros para la producción de concentrados (Figura 2).

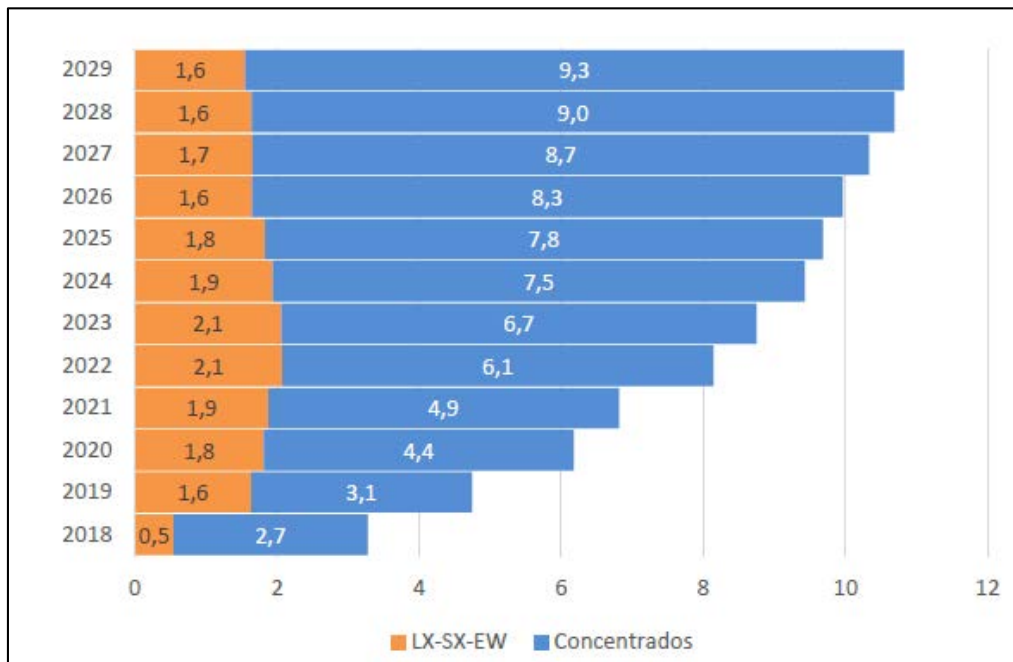


Figura 2: Consumo de agua de mar según tipo de proceso en la minería del cobre, período 2018-2029 (Cochilco, 2018).

En cuanto a la recirculación (reciclado) de agua, se estima que esta alcanza en la minería actual un 73% (Consejo Minero, 2015). Sin embargo, esta estimación corresponde a ecuaciones que marcan la entrada y salida del recurso al sistema, el que no ha sido llevado a modelos de bloques.

b) Integración de variables no tradicionales a los modelos de bloques

Con respecto a estudios que hablen de la incorporación del parámetro de consumo de agua en modelos de bloques no se han encontrado en la literatura formal. Sí los hay de incorporación de otras variables denominadas “sustentables” por parte de algunos autores.

Bascetin y Sertabipoglu (2010), estudiaron el efecto del tamaño de los bloques en la generación de residuos. Osanloo *et al.* (2008) y Scott *et al.* (1996), respectivamente, estudiaron modelos para minimizar el drenaje ácido incluyendo estas variables al modelo de bloques.

Muñoz *et al.* (2014), desarrollaron una metodología donde consideraron variables socioambientales las que incorporaron al modelo de bloques para considerarlas en etapas de factibilidad de un proyecto. Según los autores estas variables permitirían realizar un diseño y planificación minera más responsable con el entorno lo que generaría una minería sustentable. Una de las variables consideradas fue el consumo de agua fresca pero que era integrada junto a las otras variables definidas en su trabajo. Esta integración no permite estimar el impacto del agua solamente sino la combinación de las denominadas variables socioambientales. Finalmente, como conclusión de su trabajo se indica que la incorporación de variables sustentables a un modelo de bloques siempre impactará en una baja en VAN del proyecto y además requerirá mayores recursos en su elaboración.

4. METODOLOGÍA

La definición de las etapas de la metodología combina fórmulas necesarias rescatadas de los trabajos de Contreras (2016) y Cochilco (2009). En base a ello, se definió una metodología dividida en cuatro pasos. El primero corresponde a la valorización del modelo de bloques original sin la variable agua, que corresponde a lo clásico y cotidiano que se realiza en los proyectos mineros actualmente. El segundo corresponde a la incorporación de la variable agua a la base de datos para ser incluida en las valorizaciones futuras. El tercero corresponde a la valorización del modelo de bloques original con la variable de agua incorporada. Finalmente, el cuarto paso consiste en comparar los modelos obtenidos en sus diferentes escenarios de valorización.

La metodología en detalle se explica a continuación:

- 1) **Valorización de Modelo de bloques sin variable agua:** para ello se utilizará el clásico modelo de optimización de maximización del Valor Actualizado Neto (VAN) del proyecto sujeto a variables que le entregan y regulan en precio de cada bloque.

El beneficio en dólares de cada bloque estará determinado por la siguiente expresión (Contreras, 2016):

$$\text{Ingresos} = T \times \text{Ley} \times (\text{P}_{\text{CU}} - \text{D}_{\text{CU}}) \times \text{Rec} \times 2204,62 \text{ [t/lb]} \quad (1)$$

$$\text{Gasto} = T \times (\text{C}_{\text{M}} + \text{C}_{\text{P}} + \text{C}_{\text{R}})$$

$$\Rightarrow \text{Beneficio} = \text{Ingresos} - \text{Gasto} \text{ [US\$]} \quad (2)$$

Donde:

T: Tonelaje total (t).

Ley: Ley de Cobre Total (%).

P_{CU}: Precio de la libra de cobre (US\$/lb).

D_{CU}: Descuento por venta a concentrado en (US\$/lb).

Rec: Recuperación metalúrgica.

C_M: Costo Mina en (US\$/t).

C_P: Costo Planta en (US\$/t).

C_R: Rentabilidad mínima exigida por tonelada explotada en (US\$/t).

Posteriormente, se asumió que el yacimiento tiene puntos de extracción o frentes de producción que se encuentran definidos e incorporados en el modelo de bloques con la misma probabilidad de extracción a recursos infinitos. Esto permite maximizar los ingresos del yacimiento y permite estimar la inversión asociada a incorporar los puntos de extracción mediante la siguiente expresión (Contreras, 2016):

$$\text{Inversión} = A \times C_{\text{Prep}} \text{ [US\$]} \quad (3)$$

Donde:

A: Área de punto de extracción.

C_{Prep}: Costo de preparación de punto de extracción.

Todo lo calculado anteriormente aplicado a bloques unitarios y puntos de extracción debe contabilizarse para todo el modelo de bloques, el que se obtendrá con la siguiente expresión (Contreras, 2016):

$$\text{Beneficio Acumulado} = - \text{Inversión}^* + \text{Beneficio}^* + \sum \text{Beneficio}^{**} \text{ [US\$]}$$

Donde:

*: Bloque actual en explotación.

** : Bloques anteriores ya explotados.

Lo anterior permitirá definir las envolventes económicas que define el material (mineral) que conduce al mejor negocio productivo del recurso. Todas estas variables se verán reflejadas en el VAN del proyecto (Figura 3).

	Valorización KUS\$	Periodo de Extracción	Valor Actualizado KUS\$	Valor Acumulado KUS\$
0.41%	-122	2	-104	-97
0.55%	-29	2	-24	6
0.6%	5	2	4	31
0.61%	12	1	10	27
0.77%	118	1	109	16
0.92%	218	1	202	-93
1.02%	285	1	264	-295
1.17%	385	0	385	-559
1.25%	439	0	-944	-944
	• Ingresos • Costos	$1/(1+tasa)^i$	Inversión agregada en UBC 1	MAX VAN 31 KUS\$ - 140 [m]

Figura 3: Resumen de metodología de evaluación económica (Contreras, 2016).

- 2) **Incorporación de la variable de consumo de agua**: se procederá a incorporar la variable agua al modelo de bloques en base a las variables técnicas de este último (posición, dureza, tipo de mineral, etc.). El consumo de agua será ingresado en la variable objetivo como costo asociado al procesamiento del mineral extraído por cada bloque. La obtención del consumo de agua en cada bloque estará dada por la siguiente fórmula (Cochilco, 2009):

$$\text{Consumo de agua} = \text{Mineral procesado} \times \text{Consumo Unitario Agua [m}^3\text{]}$$

Donde:

Mineral Procesado: Toneladas métricas de mineral a tratar (TM).

Consumo unitario de Agua: Cantidad de agua (fresca, recirculada o total) utilizada para procesar u obtener 1 unidad de materia prima o de producto, según corresponda (m³/TM).

El costo asociado al consumo de agua en un bloque será:

$$C_w = \text{Consumo de agua} \times P_w \text{ [US$]}$$

Donde:

C_w : Costo del agua (US\$).

P_w : Precio del agua por metro cúbico (US\$/m³).

Consumo de agua: metros cúbicos (m³).

- 3) **Valorización del Modelo de bloques con la variable de consumo de agua:** En este caso, se aplicará el modelo de optimización de maximización del Valor Actualizado Neto (VAN) del proyecto sujeto a variables que le entregan y regulan en precio de cada bloque.

Al igual que en la valorización del modelo sin la variable agua la expresión de Ingresos queda representada por la ecuación (1). Sin embargo, el valor del Gasto quedaría expresado por:

$$\mathbf{Gasto}_w = \mathbf{T} \times (\mathbf{C}_M + \mathbf{C}_P + \mathbf{C}_R + \mathbf{C}_w) \quad (4)$$

Donde:

T : Tonelaje total (t).

C_M : Costo Mina en (US\$/t).

C_P : Costo Planta en (US\$/t).

C_R : Rentabilidad mínima exigida por tonelada explotada en (US\$/t).

C_w : Costo del agua (US\$).

Por ende, el beneficio a obtener en el bloque unitario incluyendo los costos del agua serán:

$$\mathbf{Beneficio}_w = (1) - (4)$$

En el caso de la inversión necesaria para explotar cada punto de extracción de bloques corresponde a la Ecuación (3).

Al escalar el beneficio acumulado que entrega el modelo de bloques tenemos:

$$\mathbf{Beneficio Acumulado}_w = - (3)^* + \mathbf{Beneficio}_w^* + \sum \mathbf{Beneficio}_w^{**} \text{ [US\$]}$$

Donde:

*: Bloque actual en explotación.

** : Bloques anteriores ya explotados.

De forma análoga a la etapa 1 se definirá la altura de columnas como parte de la planificación minera y que ambas conjugadas nos entregará el VAN del proyecto con esta variable (figura 3).

- 4) **Comparación entre modelos obtenidos:** En este caso, se compararán los modelos obtenidos entre sí para analizar los resultados en cada uno de los escenarios obtenidos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por temas de confidencialidad solicitado por la empresa que proporcionó los datos del modelo de bloques, al yacimiento se le denominará la mina “El Roble”, ubicada en la cordillera de Los Andes en la zona centro norte de Chile. Éste yacimiento corresponde a un pórfido cuprífero donde su mineralogía principal corresponde sulfuros de cobre: calcopirita y bornita. Su explotación corresponde a minería subterránea por el método de hundimiento por bloques (*Block caving*).

El modelo de bloques de la mina “El Roble” está compuesto por 176.912 bloques de 20 m x 20 m x 20 m lo que entrega un área por bloque de 400 m² de material. Cada bloque del modelo tiene incorporado las siguientes variables:

X	Y	Z	Tipo Roca	Densidad [t/m ³]	CuT%	Wi	Tonelaje	Finos Cu [t]
---	---	---	-----------	------------------------------	------	----	----------	--------------

Donde **X** e **Y** corresponde a las coordenadas UTM y **Z** a la cota en que se encuentra; **Tipo Roca** define la roca que se encuentra en ese bloque; **Densidad** corresponde a la densidad de roca del mismo; **CuT%** corresponde a la Ley de Cobre Total contenida en el bloque; **Wi** corresponde al Work Index que es el índice de trabajo usado en la conminución de la roca; **Tonelaje** correspondiente al bloque; **Fino Cu** corresponde a cobre que se puede obtener por el procesamiento mineral en el bloque.

1) Valorización de Modelo de bloques sin variable agua

Para calcular el beneficio de cada bloque se consideraron los siguientes valores proporcionados por la compañía minera:

(P_{CU}-D_{CU}): US\$ 2,4 [lb/Cu]

Costos operacionales (C_M+C_P+C_R): 20 [US\$]

Recuperación mineral: 88%

Esta información junto a los valores asumidos permite obtener la valorización de cada bloque que forma parte del modelo (figura 4):

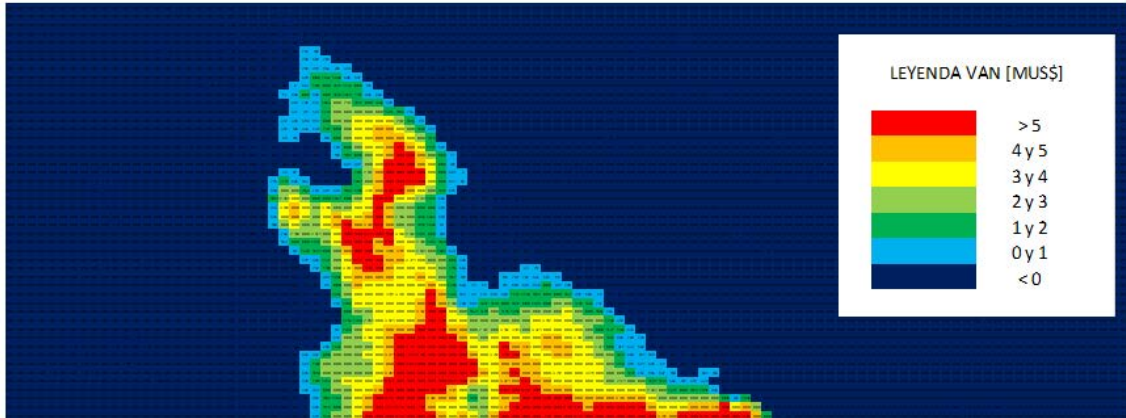


Figura 4: VAN unitario de cada bloque que compone el modelo de bloques de la mina “El Roble” sin la variable agua.

El valor arrojado permite hacer definiciones con respecto a la planificación minera la que entregan alturas de columnas óptimas que permiten maximizar el beneficio que darán el espacio a las galerías para proceder con la extracción (figura 5):

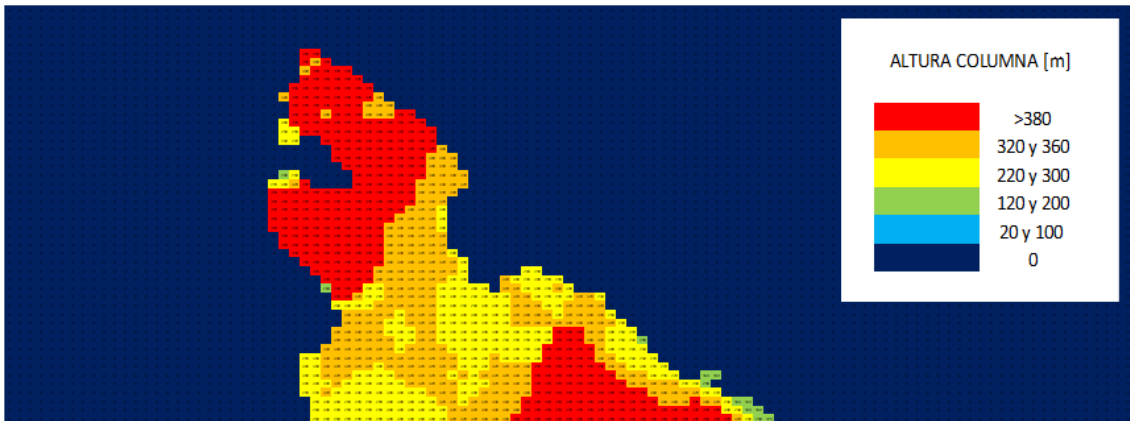


Figura 5: Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” sin la variable agua.

Conjugando el VAN de cada bloque y la altura de columnas se obtiene:

VAN Puntos de Extracción Envolvente Teórica:	2.756 [MUS\$]
Tonelaje:	453,6 [Mt]
Ley Media CuT:	0,681 [%]
Tonelaje Cobre Fino Mina:	3,1 [Mt]
Número Puntos de Extracción con VAN\geq0	1.287
Altura media de columnas	303,3 [m]

2) Incorporación de la variable de consumo de agua

a) Agua desalinizada:

Este valor fue agregado a los costos involucrados en cada bloque para posteriormente calcular el beneficio de ellos.

Los valores asumidos para este trabajo corresponden a los entregados por BCN (2017):

P_w : 5 [US\$/m³]

Consumo de agua: 0,7 [m³]

b) Agua fresca (agua continental):

Al igual que con el agua desalinizada, el valor del agua fresca fue agregada a los costos de cada bloque, para de esta forma obtener el beneficio de cada uno de ellos.

Los valores a utilizar para este trabajo corresponden a los entregados por BCN (2017):

P_w : 1,6 [US\$/m³]

Consumo de agua: 0,7 [m³]

3) Valorización del Modelo de bloques con la variable de consumo de agua

a) Agua desalinizada:

Con la variable de agua desalinizada incorporada en el modelo de bloque se procedió a valorizar el beneficio de cada uno de los bloques unitarios del modelo (Figura 6).

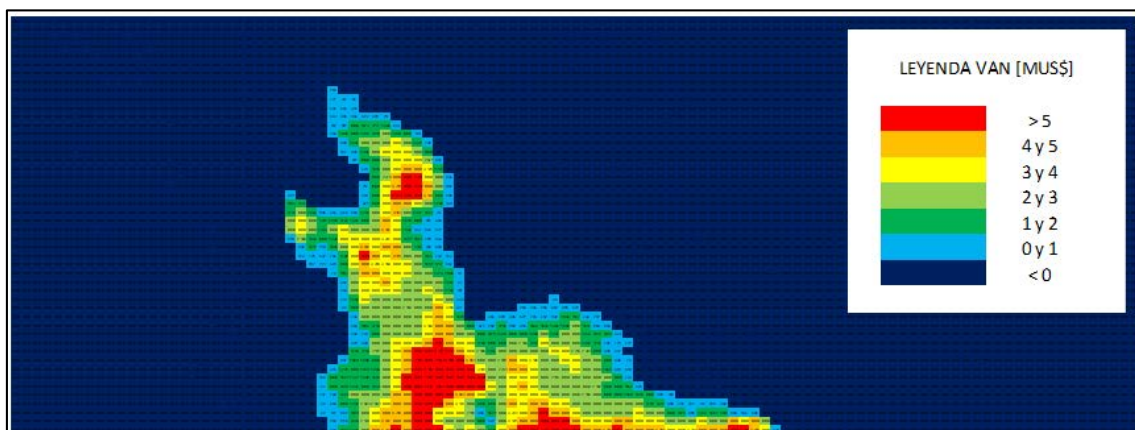


Figura 6: VAN unitario de cada bloque que compone del modelo de bloques de la mina “El Roble” con la variable agua desalinizada incorporada.

Como parte de la planificación minera se procede a estimar alturas de columnas (figura 7) que servirán de soporte para las galerías de extracción de la mina maximizando su beneficio económico:

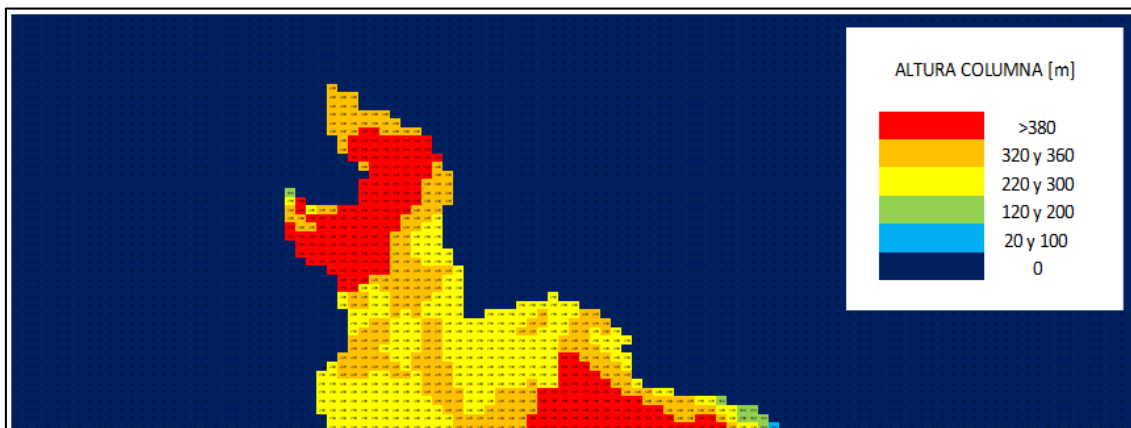


Figura 7: Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” con la variable agua desalinizada.

Conjugando el VAN de cada bloque y la altura de columnas se obtiene para el modelo de bloques:

VAN Puntos de Extracción Envolvente Teórica:	1.892 [MUS\$]
Tonelaje:	363,2 [Mt]
Ley Media CuT:	0,734 [%]
Tonelaje Cobre Fino Mina:	2,7 [Mt]
Número Puntos de Extracción con VAN\geq0	1.071
Altura media de columnas	291,1 [m]

b) Agua fresca (agua continental):

Con la variable de agua desalinizada incorporada en el modelo de bloque se procedió a valorizar el beneficio de cada uno de los bloques unitarios del modelo (Figura 8).

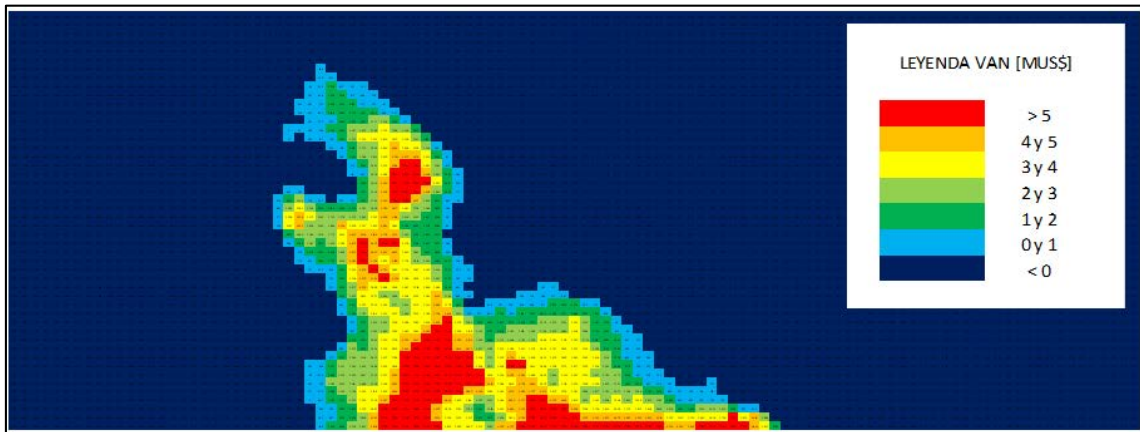


Figura 8: VAN unitario de cada bloque que compone del modelo de bloques de la mina “El Roble” con la variable agua fresca incorporada.

Como parte de la planificación minera se procede a estimar alturas de columnas (figura 9) que servirán de soporte para las galerías de extracción de la mina maximizando su beneficio económico:

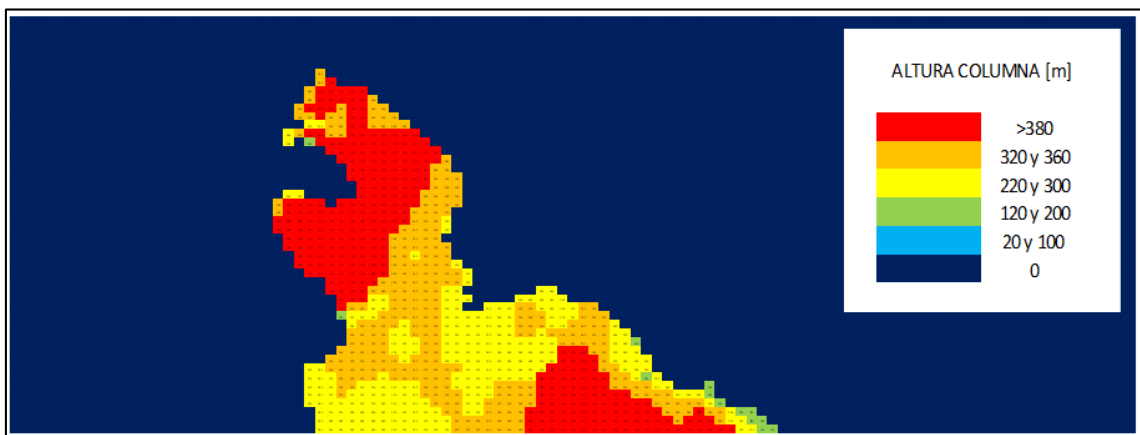


Figura 9: Alturas de columnas óptimas para la explotación subterránea de la mina “El Roble” con la variable agua fresca.

Conjugando el VAN de cada bloque y la altura de columnas se obtiene para el modelo de bloques:

VAN Puntos de Extracción Envolverte Teórica:	2.457 [MUS\$]
Tonelaje:	424,9 [Mt]
Ley Media CuT:	0,697 [%]
Tonelaje Cobre Fino Mina:	3,0 [Mt]
Número Puntos de Extracción con VAN\geq0	1.214
Altura media de columnas	300,1 [m]

4) Comparación entre modelos obtenidos

a) Modelo con variable de Agua desalinizada v/s Modelo original:

Al analizar los VAN unitarios de cada bloque que compone el modelo bloques se puede apreciar un alza en el VAN con la variable de agua desalinizada incorporada visto desde el enfoque de rentabilidad (VAN >0). A su vez, se puede apreciar una baja en la extensión del yacimiento a explotar.

El alza del VAN (figura 10) se explica por el costo del agua desalinizada que sube el valor del bloque lo que obliga a considerar leyes minerales más altas para alcanzar una rentabilidad favorable.

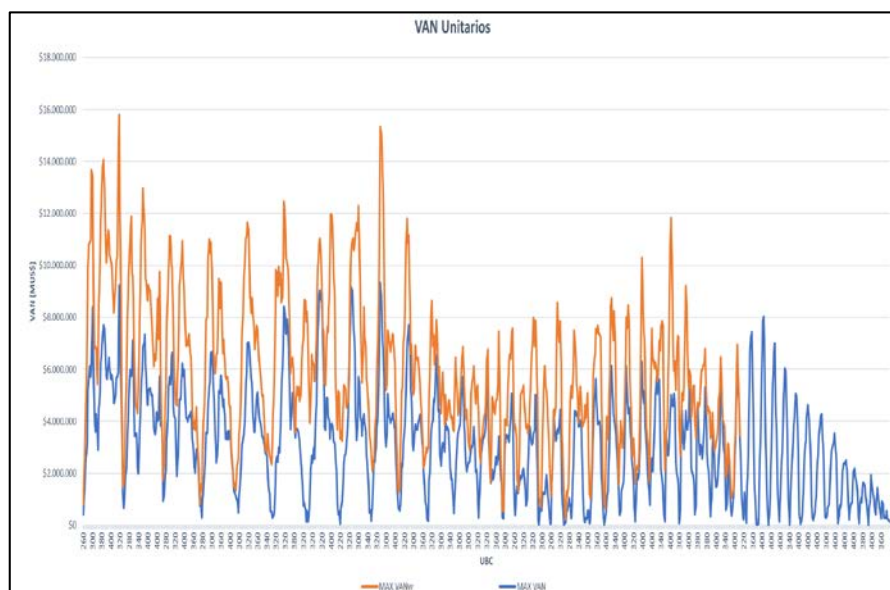


Figura 10: Comparación VAN > 0 unitarios de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua desalinizada (línea naranja).

De la misma forma, pero analizando los VAN < 0 de ambos modelos bloques (figura 11) se tiene que la variable agua desalinizada impacta fuertemente con una baja en su valor. Esto implica que en dichos bloques se hace inviable la explotación dada su baja rentabilidad.

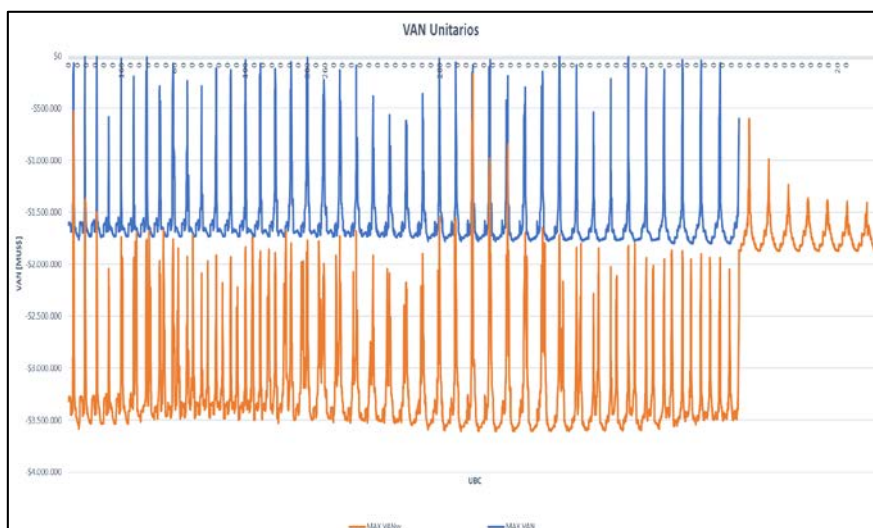


Figura 11: Comparación de VAN < 0 unitarios de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua desalinizada (línea naranja).

Por otra parte, las alturas de columnas óptimas para maximizar la rentabilidad de la mina demuestran que en el modelo de bloques con la variable agua desalinizada disminuyen en altura, lo que de alguna forma reflejará la mayor concentración de leyes de cobre total y menor tonelaje de extracción, por lo tanto, una menor dilución en las leyes minerales.

En el perfil transversal Norte 440 (figura 12) se muestra la similitud en el alto de las columnas de ambos modelos entre las coordenadas Este 480 y 850. Sin embargo, hay sectores que muestran alturas de columnas que no son rentables económicamente en el modelo con agua y si lo son con el modelo sin agua.

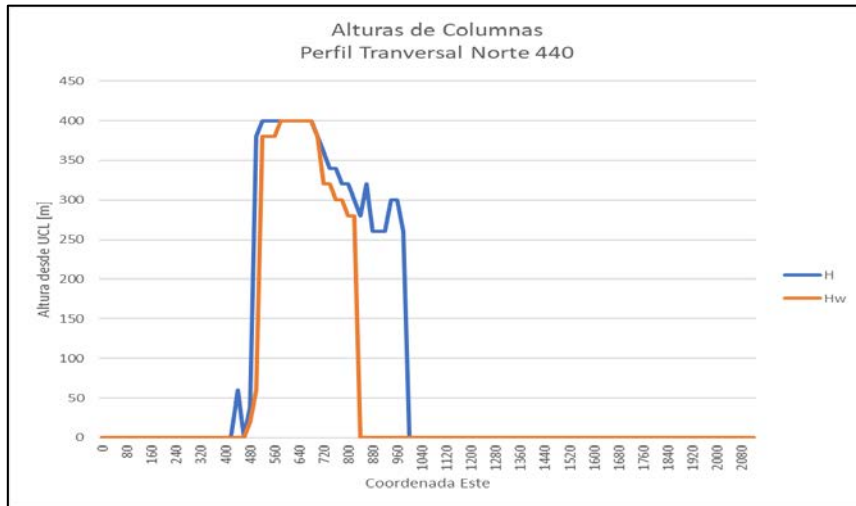


Figura 12: Perfil longitudinal Norte 440 que muestra la comparación de alturas de columnas en relación a las coordenadas Este del yacimiento. Altura de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua desalinizada (línea naranja).

Observando la baja de alturas se puede apreciar en el perfil transversal Este (figura 13) que la altura de las columnas en el modelo con agua desalinizada disminuye un 5% en promedio con respecto a las columnas estimadas por el modelo sin agua, pudiendo llegar a un 100% en algunos sectores lo que demuestra que zonas que en el modelo sin agua eran productivas ahora son zonas no productivas en el yacimiento.

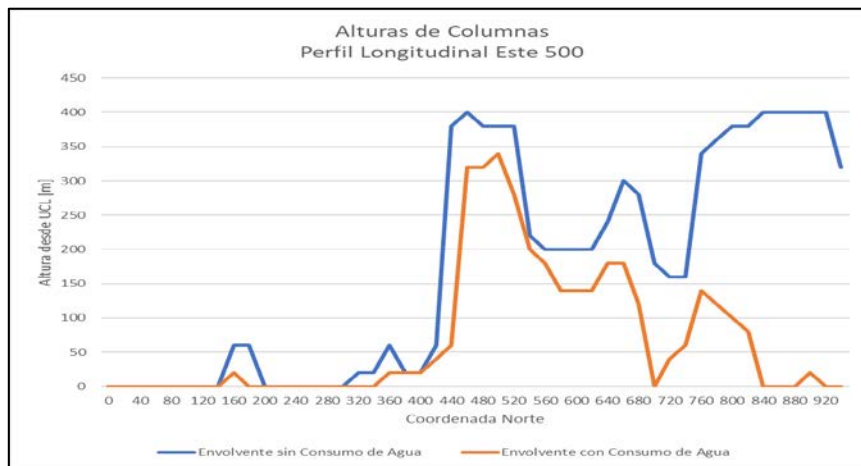


Figura 13: Perfil Longitudinal Este 500, que muestra la comparación de Alturas de Columnas en relación a las coordenadas Norte del yacimiento. Altura de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua desalinizada (línea naranja).

Todo lo anterior demuestra que la planificación minera se ve fuertemente afectada a la incorporación de la variable agua, pues restringe la rentabilidad del yacimiento.

b) Modelo con variable de Agua fresca v/s Modelo original:

Al comparar los VAN unitarios de cada bloque que compone ambos modelos bloques se puede apreciar una baja en el VAN con la variable de agua fresca incorporada visto desde el enfoque de rentabilidad ($VAN > 0$). A su vez, se puede apreciar una baja en la extensión del yacimiento a explotar.

La baja del VAN (figura 14) se explica por el costo del agua fresca que sube el valor del bloque lo que obliga a considerar leyes minerales más altas en la definición de la envolvente, no siendo está óptima para superar una rentabilidad superior a la del modelo original.

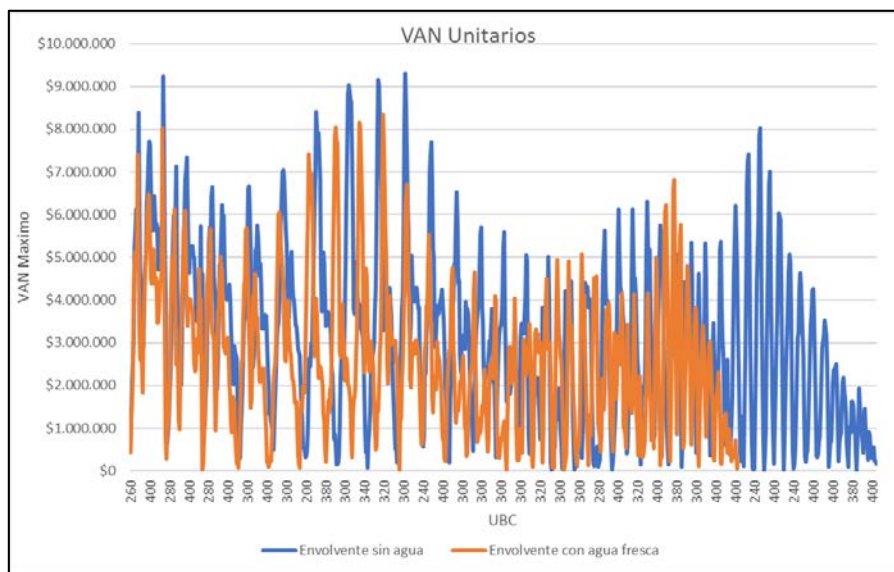


Figura 14: Comparación $VAN > 0$ unitarios de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua fresca (línea naranja).

De la misma forma, pero analizando los $VAN < 0$ de ambos modelos bloques (figura 15) se tiene que la variable agua fresca impacta con una baja en su valor. Esto implica que en dichos bloques se hace inviable la explotación dada su baja rentabilidad.

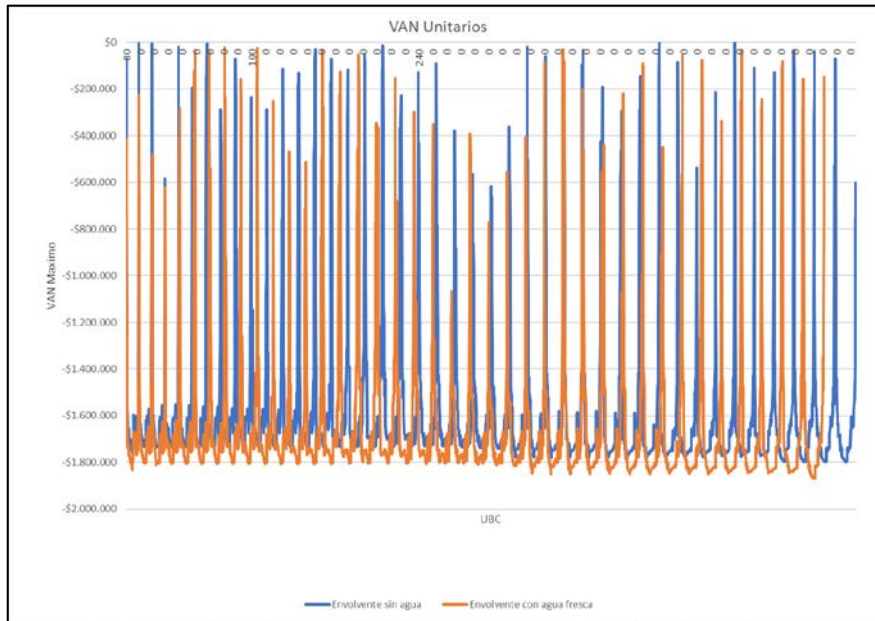


Figura 15: Comparación de VAN < 0 unitarios de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua fresca (línea naranja).

En el perfil transversal Norte 440 (figura 16) se muestra la similitud en el alto de las columnas de ambos modelos. Sólo en las coordenadas Este 900 y 1000 se aprecian diferencias significativas no siendo explotables zonas que antes si lo eran en el modelo original. Las extensiones del yacimiento en ambos son similares entre sí, por lo que el impacto del modelo con agua fresca no afecta en demasía la extensión del mismo.

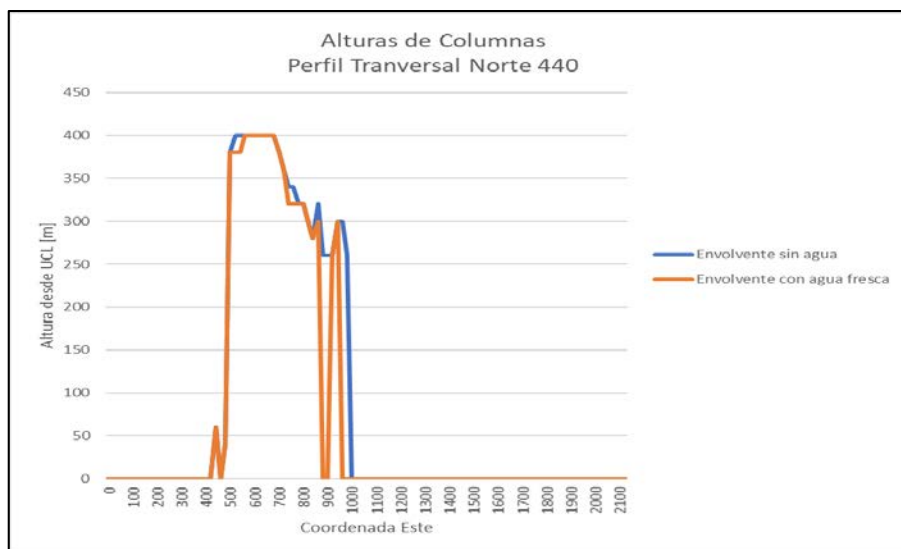


Figura 16: Perfil longitudinal Norte 440 que muestra la comparación de alturas de columnas en relación a las coordenadas Este del yacimiento. Altura de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua fresca (línea naranja).

Observando la baja de alturas se puede apreciar en el perfil transversal Este 500 (figura 17) que la altura de las columnas en el modelo con agua fresca disminuye un 2% en promedio con respecto a las columnas estimadas por el modelo sin agua.

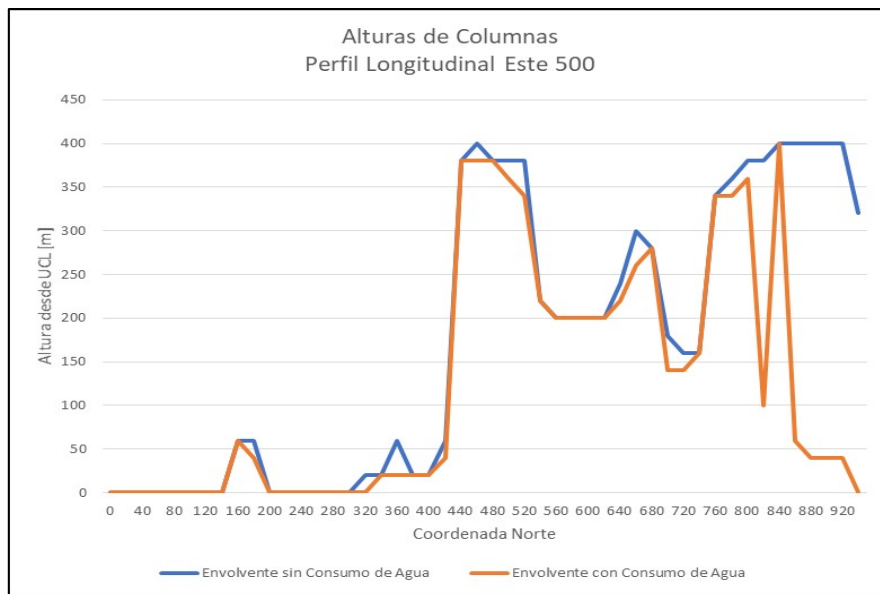


Figura 17: Perfil Longitudinal Este 500, que muestra la comparación de Alturas de Columnas en relación a las coordenadas Norte del yacimiento. Altura de bloques sin la variable agua (línea azul) y con la variable agua fresca (línea naranja).

c) VAN globales de los modelos de bloques:

El VAN unitario de cada bloque que componen los modelos de bloques con agua desalinizada, con agua fresca y sin agua de la mina “El Roble” permite definir el alto de columna óptimas para maximizar la rentabilidad del yacimiento. Esto permite conjugar y entregar los indicadores comparativos entre los modelos.

En el global del modelo de bloques la incorporación de la variable agua desalinizada y agua fresca tiene impacto en todos los indicadores del proyecto, mostrando una baja en casi todos ellos menos en la Ley de cobre total, la que aumenta debido a la disminución

del alto de columnas y a la mayor concentración de leyes que permiten la rentabilidad de bloques productivos. La comparación entre los diferentes modelos de bloques arroja lo siguiente:

Diferencias entre modelo de Bloques original y Modelo con agua desalinizada		
Indicadores de Proyecto	Variación de indicadores	% de Variación
VAN	- 864 [MUS\$]	-31,4%
Tonelaje	- 90,4 [Mt]	-20%
Ley Media CuT	+0,053 [%]	+8%
Tonelaje Cobre Fino Mina	- 0,1 [Mt]	-3,2%
Número Puntos de Extracción con VAN\geq0	-216	-17%
Altura media de columnas	-12,2 [m]	-4%

Diferencias entre modelo de Bloques original y Modelo con agua fresca		
Indicadores de Proyecto	Variación de indicadores	% de Variación
VAN	- 299 [MUS\$]	-11%
Tonelaje	- 28,7 [Mt]	-7,3%
Ley Media CuT	+0,016 [%]	+2,3%
Tonelaje Cobre Fino Mina	- 0,4 [Mt]	-13%
Número Puntos de Extracción con VAN\geq0	-73	-5,7%
Altura media de columnas	-3,2 [m]	-0,73%

A simple vista el modelo más conveniente es el modelo de bloques con la variable de agua fresca, pues los indicadores así lo reflejan. Sin embargo, la mina “El Roble” en su plan de sustentabilidad y gestión del recurso hídrico tiene planificado utilizar agua marina desalinizada para sus procesos mineros.

Es importante señalar, que el tonelaje de cobre fino mina en la comparación de los distintos modelos muestran una variación de 0,1 Mt del modelo de agua desalinizada con respecto al modelo original versus un 0,4 Mt del modelo de agua fresca con respecto al

modelo original. Esto se explica por el significativo aumento de la ley mineral en el caso del agua desalinizada y a la baja en la altura de las columnas, lo que permite menos dilución mineral en los bloques.

Con respecto a las diferencias de VAN al comparar los distintos modelos se puede indicar que el más conveniente es el del agua fresca, puesto que este modelo disminuye la extensión de la envolvente económica que se ve reflejada en una disminución los puntos de extracción, los cuales son 3 veces mayor a los del modelo con agua desalinizada.

En general, se reconoce de éstos que las variables críticas en el modelo de bloques que inciden en el VAN global de los modelos de bloques con agua desalinizada y agua fresca es la ley mineral, precio del cobre y la altura de las columnas.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo se puede afirmar que al igual que Cochilco (2018), se aprecia que la mayor demanda actual de agua es de origen continental, lo que se debe a su bajo costo y que este trabajo se refleja en el VAN más favorables que los proyectos con agua desalinizada. Es importante señalar, que actualmente el uso preferente de este recurso en depósitos tipo pórfidos cupríferos permite mover mayor tonelaje con leyes minerales más bajas. Es decir, al tener una menos restricción en el costo permite un mejor aprovechamiento del recurso mineral existente en el yacimiento.

Por otra parte, en este trabajo la incorporación de las variables de aguas a un modelo de bloques tiene el mismo efecto declarado por Muñoz *et al.* (2014), en los que se aprecia un impacto en la baja del VAN del proyecto minero, pues al considerar los costos de estas nuevas variables, estas inciden en el beneficio final de cada bloque que conforma el respectivo modelo. En los escenarios vistos, el alto costo del agua desalinizada provoca la baja más significativa en el VAN del proyecto. Sin embargo, es una de las formas de hacer de la minería una actividad sustentable, por lo que se espera que en mediano a largo plazo la totalidad de los procesos mineros se lleven a cabo con este tipo de recurso hídrico. En este trabajo a diferencia del de Bascetin y Sertabipoglu (2010), no se estimaron residuos que permitan la recirculación del recurso en el sistema, pues las cifras del mismo entregadas por el Consejo Minero (2015), no han sido cuantificadas en las etapas primarias de un modelo de bloques que considere el agua. Sin duda, esta tendría un beneficio adicional que repercutiría en un VAN favorable de los proyectos mineros.

6. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado en la mina “El Roble” se pueden desprender las siguientes conclusiones:

- 1) El $VAN > 0$ de los bloques unitarios del modelo de bloque con agua fresca disminuye con respecto a los mismos bloques unitarios del modelo original. Esta baja se explica por el costo del agua fresca que sube el valor del bloque lo que obliga a considerar leyes minerales más altas en la definición de la envolvente, no siendo ésta óptima para superar una rentabilidad superior a la del modelo original. Por otra parte, se puede apreciar una leve disminución en el área de explotación debido a que la incorporación de la variable agua en sectores que antes eran viables económicamente ya no lo son.
- 2) El $VAN > 0$ de los bloques unitarios del modelo de bloque con agua desalinizada aumenta considerablemente con respecto a los mismos bloques unitarios del modelo original. Esta alza se explica por las mayores leyes de cobre concentradas en las mismas zonas que están dadas por una disminución en la dilución de bloque (menor tonelaje extraído). Por otra parte, se puede apreciar una disminución en el área de explotación debido a que la incorporación de la variable agua en sectores que antes eran viables económicamente ya no lo son.
- 3) El $VAN < 0$ de los bloques unitarios del modelo de bloques con agua fresca disminuye con una baja en su valor con respecto a los mismos bloques unitarios sin agua. Esto implica que en dichos bloques aumenta la baja rentabilidad de dichos bloques lo que ratifica la inviabilidad de la explotación en dichos sectores del yacimiento.
- 4) El $VAN < 0$ de los bloques unitarios del modelo de bloques con agua desalinizada disminuye considerablemente con respecto a los mismos bloques unitarios sin agua. Esta mayor disminución está asociado al costo del agua desalinizada que aumenta de mayor forma la no rentabilidad de dichos bloques.

- 5) La planificación minera expresada a través de las alturas de columnas se ven afectadas por ambos modelos con aguas incorporadas, pues restringen las zonas potencialmente rentables a explotación. Un mayor precio en el cobre podría abrir nuevos espacios que están al límite de la viabilidad económica. De la misma forma, un menor precio del cobre perjudicaría la planificación minera restringiendo aún más la zonas productivas de la mina “El Roble”.
- 6) El incorporar la variable agua fresca en el modelo de bloques afecta en una disminución de un -11% en el VAN total de la mina “El Roble” con respecto al modelo sin la variable agua. Sin embargo, esta incorporación aumenta el valor promedio de la Ley de cobre total, pero disminuye el tonelaje a procesar y, por ende, el cobre fino total.
- 7) El incorporar la variable agua desalinizada en el modelo de bloques afecta en una disminución de un -31,4% en el VAN total de la mina “El Roble” con respecto al modelo sin la variable agua. Sin embargo, esta incorporación aumenta el valor promedio de la Ley de cobre total, pero disminuye el tonelaje a procesar y, por ende, el cobre fino total.
- 8) Considerando el precio del agua como base en la valorización, se reconocen como variables críticas que impactan fuertemente en el VAN total del proyecto la ley mineral, el precio del cobre y las alturas de las columnas.
- 9) Considerar agua fresca involucra precios menores y muestra una mayor rentabilidad del yacimiento con respecto al modelo con agua desalinizada. Lamentablemente una medida de este tipo es poco sustentable, dada lo escaso del recurso hídrico, lo que obliga a considerar la desalinización del agua de mar para ser usado en el procesamiento mineral.
- 10) El incluir la variable agua en los modelos de bloques refleja una cuantificación realista en cuanto a los costos en ellos y que no son considerados en la estimación de recursos.

- 11) Como sugerencia se propone realizar un estudio de sensibilidad que estudie distintos escenarios en donde la viabilidad económica del yacimiento se hacen críticos (por leyes minerales, precio del cobre, altura de columnas y precio del agua).

- 12) Se sugiere realizar una investigación acabada con respecto a la recirculación de agua, pues considerer esta variable afectaría de Buena forma en el beneeficio de los bloques y enel VAN de los distintas opciones evaluadas del proyecto minero.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Bascetin, A., & Sertabipoglu, Z. (2010). Strategic Mine Planning And Design For Quarrying. SME Annual Meeting 2010. Phoenix, AZ: The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile - BCN (2017). Análisis económico de aspectos asociados a la desalinización del agua en la minería. Valparaíso, Chile. Recuperado el 19 de Junio de 2019, de <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=114031&prmTIPO=DOCUMENTOCO MISION>
- Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO. (2009). Gestión del recurso hídrico y la minería en Chile. Santiago de Chile. Recuperado el 31 de Mayo de 2019, de <https://research.csiro.au/gestionrapel/wp-content/uploads/sites/79/2016/11/Gestion-del-recurso-h%C3%ADdrico-y-la-mineria-en-Chile-Proyecci%C3%B3n-Consumo-de-Agua-2009.pdf>
- Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO. (2018). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029. Santiago de Chile. Recuperado el 10 de Mayo de 2019, de <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/proyeccion%20agua%20mineria%20de%20cobre%202018-2029%20-%20vf.pdf>
- Consejo Minero (2015). Minería, Agua y Sustentabilidad. Foro Chileno – Alemán de Minería. Santiago de Chile. Recuperado el 19 de Junio de 2019, de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/Miner%C3%ADa-Agua-y-Sustentabilidad.pdf>
- Contreras, J. (2016). Metodología para determinar el valor en riesgo de un proyecto minero, mediante la aplicación de un modelo matemático de optimización. Tesis para grado de Magíster en Ingeniería Industrial. Universidad del Desarrollo. Santiago de Chile.
- Contreras, J.; Cornejo, J.; Caviedes, C. (2016). Metodología para estimación de la tasa de incorporación de área en panel caving, Codelco – División El Teniente. UMining 2016. Santiago de Chile.

- International Council of Mining and Metals - ICMM. (2012). Water management in mining: A selection of case studies. Londres, RU: ICMM.
- Lagos, G. (1997). Eficiencia del Uso del Agua en la minería del Cobre. Centro de Minería Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Li, S., Dimitrakopoulos, R., Scott, J., & Dunn, D. (2004). Quantification of Geologic Uncertainty and Risk Using Stochastic Simulation and Applications in the Coal Mining Industry. Ore body Modeling and Strategic Mine Planning Congress 2004. Perth, WA, Australia.
- Muñoz, J.; Guzmán, R.; Botín, A. 2014. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mine planning. International Journal of Mining and Mineral Engineering 5 (1):38-58.
- Osanloo, M., Rashidinejad, F., & Rezai, B. (2008). Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits. Resources Policy, Vol. 33, 2008 , 222-229.
- Scott, P., Johnston, G., Eastwood, G., Joyce, C., & Ryan, P. (1996). Sampling and Waste Block Modelling for Acid Producing Waste Rock at Cadia. AUSIMM.