

PERSPECTIVA N°13

***OPTIMIZACIÓN DE ALIMENTACIÓN PLANTA
DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL ARSÉNICO***



MAXIMIZANDO EL VALOR EN MINERÍA

Este 2016 optimiza y asegura el valor de tu operación o proyecto con las soluciones innovadoras de GEM, la empresa consultora líder de la industria minera.



EVALUACIÓN

ESTRATEGIA

ECONOMÍA

OPTIMIZACIÓN

CAPACITACIÓN

I+D



GEM
Gestión y Economía Minera Ltda.

TABLA DE CONTENIDO:

- **OPTIMIZACIÓN DE ALIMENTACIÓN PLANTA: DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL ARSÉNICO** 2
- **COMENTARIO: NO TAN RAROS** 13
- **LIBROS Y ARTÍCULOS SUGERIDOS** 15
- **CURSO DE ECONOMÍA DE MINERALES** 16

ACLARACIÓN

Este documento ha sido publicado por GEM|Gestión y Economía Minera Ltda. bajo el entendimiento de que su responsabilidad está limitada a proveer una opinión profesional e independiente. Aunque su preparación ha involucrado dedicación y cuidado razonables, GEM no garantiza la precisión del conjunto de datos, supuestos, predicciones ni de otras afirmaciones realizadas. Si el usuario utiliza este documento o su información para obtener recursos o tomar cualquier tipo de decisión que involucre otras compañías, GEM no acepta responsabilidad alguna frente a terceros, sin importar su proveniencia y sin limitaciones.

El presente reporte ha sido elaborado utilizando la Nueva Ortografía de la Lengua Española (RAE, 2010).

Este servicio ha sido entregado bajo los controles establecidos por un Sistema de Gestión de la Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001. Número de Certificado: 8309

CONTACTO

WEB: www.gem-ing.cl

TELÉFONO: + 56 2 2225 30 21

AGRADECEMOS ENVIAR SUS COMENTARIOS DE ESTE ARTÍCULO AL

MAIL: contacto@gem-ing.cl

© Gestión y Economía Minera Ltda. (GEM). 2016. Derechos Reservados

OPTIMIZACIÓN DE ALIMENTACIÓN PLANTA: DIFERENTES ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL ARSÉNICO

*Valentina Chico, Christian Lichtin
GEM | Gestión y Economía Minera Ltda.*

ARSÉNICO EN CONCENTRADOS DE COBRE

El producto principal de la flotación de cobre es el concentrado. A grandes rasgos, este proceso tiene como fin aumentar la concentración de cobre presente en el mineral, normalmente cerca de 30 veces, con el fin de hacer más eficiente el proceso posterior de fundición. No solo el cobre es recuperado en la generación de los concentrados, sino que también elementos que generan ingresos adicionales, como por ejemplo el molibdeno, oro y plata (esto dependiendo obviamente del mineral alimentado). No obstante, no solo elementos beneficiosos son recuperados, sino que también impurezas que afectan el desempeño aguas abajo. El arsénico es uno de ellos, y en altas concentraciones (generalmente mayores al 0,5% en el concentrado), generan grandes desafíos por su toxicidad. Debido a mayores exigencias medioambientales, las fundiciones han comenzado a imponer mayores restricciones a concentrados con alto contenido de arsénico. Así, en 2015 Zambia comenzó a deshacerse de concentrados provenientes de Chile por su alto contenido de arsénico (Minería Chilena, 2015), lo cual muestra cuán importante para minas con alto arsénico es planificar su producciones con restricciones adicionales.

Debido a mayores exigencias medioambientales, las fundiciones han comenzado a imponer mayores restricciones a concentrados con alto contenido de arsénico.

No todos los minerales sulfurados poseen arsénico, por lo que empresas con yacimientos de bajos o nulos niveles de arsénico no requieren evaluar el impacto de esta impureza en su planificación. Estas empresas tendrán por objetivo producir la mayor cantidad de cobre lo antes posible (considerando vectores de precios relativamente parejos ya que al considerar vectores crecientes la estrategia puede cambiar). No obstante, yacimientos que presentan altos contenidos de arsénico deben idear maneras para atenuar el impacto de este en la venta y/o procesamiento del concentrado.

El objetivo de esta Perspectiva es realizar un diagnóstico de la vulnerabilidad futura de los concentrados chilenos frente a exigencias medioambientales, analizando cómo han crecido las exportaciones de concentrado de Chile estimando una tendencia futura. Con el fin de mostrar cómo las minas pueden hacer frente a estas nuevas exigencias, se revisarán algunas acciones que buscan atenuar el impacto producido por el arsénico. A pesar de que el diagnóstico de la vulnerabilidad de los concentrados en relación al arsénico está basada en la industria chilena, los distintos mecanismos para mitigar el impacto son válidos en cualquier país. Posteriormente, a través de un ejemplo de optimización, se evaluará el impacto de incorporar nuevas restricciones asociadas a las emisiones de arsénico en donde, como resultado de la optimización, se modifica considerablemente la estrategia de alimentación de una planta concentradora o fundición respecto al caso sin restricciones.

EVOLUCIÓN VENTAS CHILENAS DE CONCENTRADO DE COBRE

Si bien gran parte del concentrado exportado por Chile no contiene altos niveles de arsénico, existen minas que actualmente enfrentan o enfrentarán este problema. Los

ejemplos más importantes son dos minas de Codelco: Ministro Hales y Chuquicamata. No obstante, la tendencia que presenta Chile es precisamente la de aumentar la producción de cobre mina a través de concentrado, eventualmente presentando cierta vulnerabilidad futura. Lo anterior, sumando a nuevas exigencias medioambientales en el país, puede hacer que el impacto del arsénico en Chile sea aún mayor en las próximas décadas.

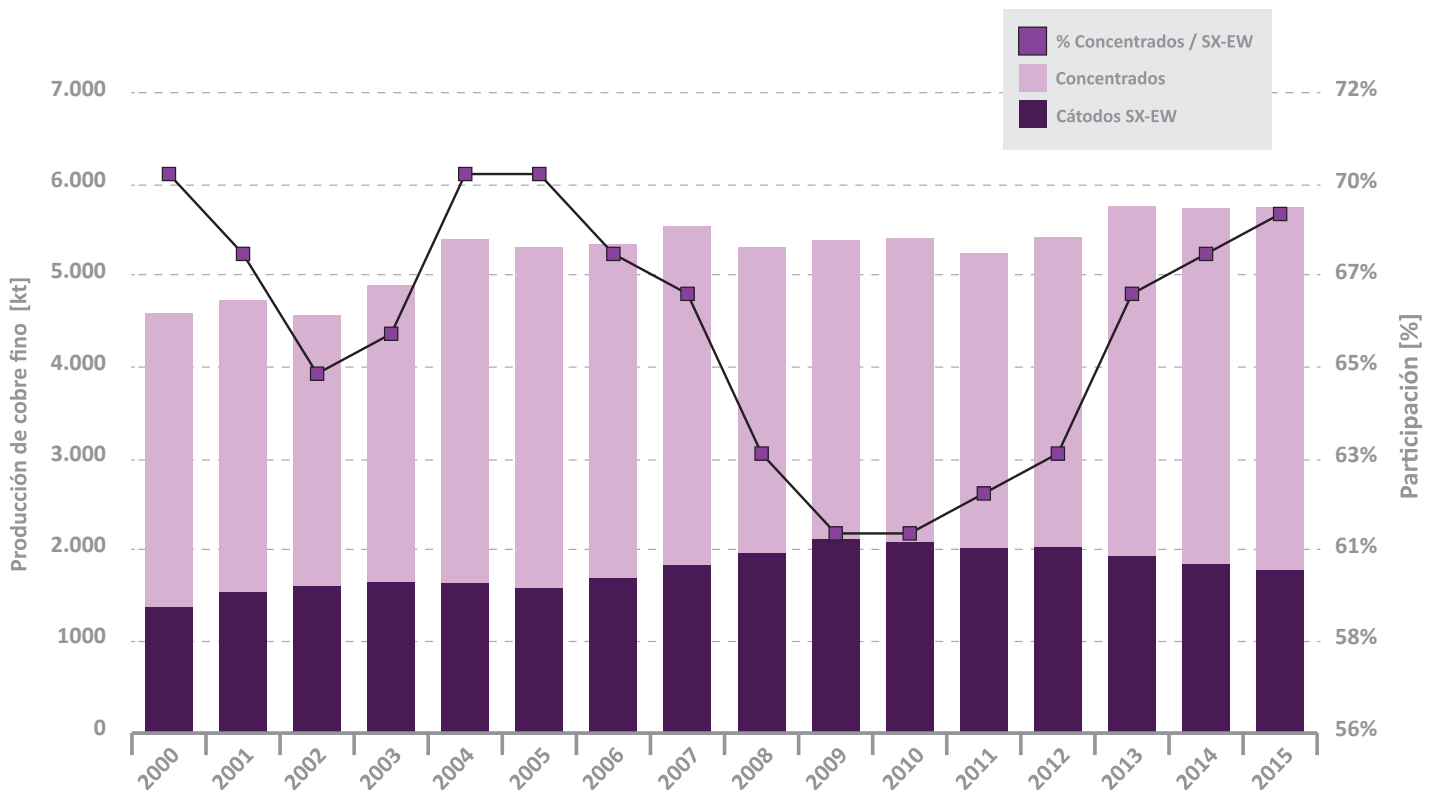
La **FIGURA 1** muestra el desglose de la producción chilena dependiendo del procesamiento realizado. Se aprecia que desde el año 2010 la proporción de cobre mina vía concentrados ha aumentado, pasando de ser un 61% a un 69% el 2015. Se espera que dicha proporción siga aumento debido al agotamiento de recursos lixiviables económicamente viables en base a las actuales tecnologías. La **FIGURA 2** muestra que en el año 2015 prácticamente la mitad de la exportación de cobre chilena fue vendida en forma de concentrado. El incremento de la participación de concentrado en las exportaciones presenta un comportamiento similar al incremento de la participación

de producción de cobre vía concentrado. La participación de concentrado en las exportaciones de cobre creció desde un 34% el año 2010 a un 47% en el 2015, lo cual muestra indicios de que la nueva producción mina de cobre proveniente de concentración de cobre ha sido exportada como concentrado.

Si se considera conjuntamente la producción de Chuquicamata y Ministro Hales, esta equivalió a casi un 10% de la producción de cobre de Chile durante el año 2015. Dicha producción no es vendida como concentrado sino que en forma de cátodos, lo que permite en parte su comercialización. No obstante, la capacidad actual instalada de fundición en Chile no presenta márgenes que permitan aumentar la producción de cátodos, y la manera de aumentar las exportaciones de cobre o simplemente mantenerla es a través de la venta de concentrado. Esto queda de manifiesto al comparar los comportamientos desde el año 2010 de la **FIGURA 1** y **FIGURA 2**.

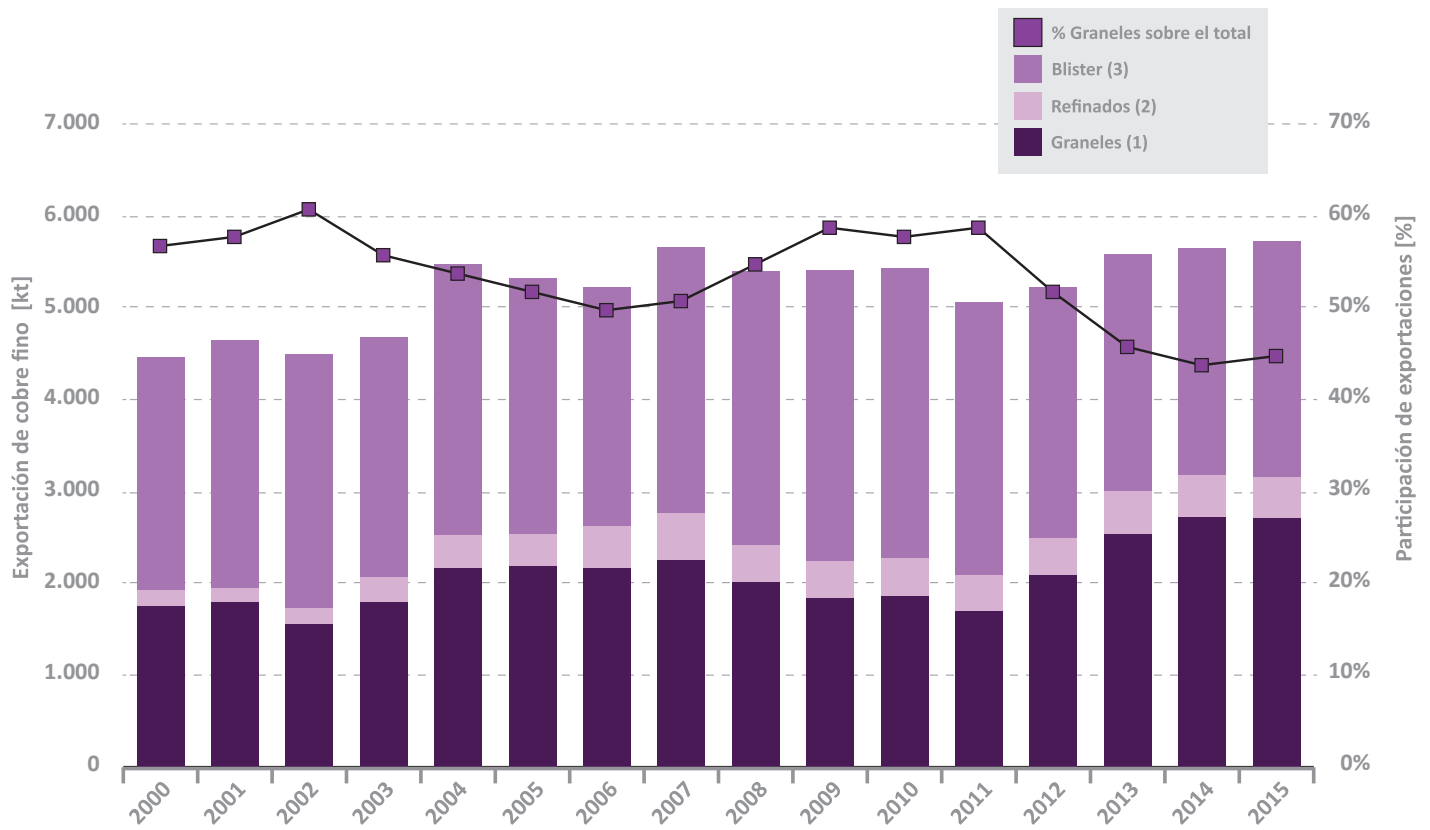
Cuánto del concentrado producido en un futuro será penalizado por contenidos de impurezas escapa el alcance

FIGURA 1. EVOLUCIÓN PRODUCCIÓN DE COBRE SEGÚN LÍNEA DE PROCESAMIENTO



Fuente: Cochilco

FIGURA 2. DESGLOSE DE LAS EXPORTACIONES CHILENAS DE COBRE



- (1) Incluye cementos, concentrados y cobre secundario
- (2) Incluye blíster y ánodos
- (3) Incluye cátodos, formas especiales y refinado a fuego

Fuente: Cochilco

de este Perspectiva, sino que el objetivo es más bien mostrar que el incremento de la participación de venta de concentrado en Chile puede aumentar la vulnerabilidad respecto a restricciones medioambientales, como el arsénico, y qué medidas pueden tomar las minas que enfrentan este tipo de impurezas en sus minerales.

Antes de comenzar con lo anterior es importante detenerse a revisar aspectos relevantes del arsénico con el fin de entender dicha impureza.

ARSÉNICO: PRODUCCIÓN, CONSUMO Y EFECTOS

El arsénico es un metaloide que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre, siendo el 20avo elemento más abundante en esta. El arsénico se encuentra comúnmente asociado a depósitos minerales que contienen sulfuros

como cobre, níquel, plomo y cobalto entre otros (Mandal & Suzuki, 2002).

Las fuentes de arsénico al ambiente pueden ser de origen antropogénico o natural. El primer grupo incluye principalmente la minería, la fundición de metales y la quema de carbón, donde estas últimas son responsables del 60% de las emisiones de arsénico. El arsénico ambiental también se genera por procesos naturales de meteorización química y física, actividades biológicas y emisiones volcánicas (Martin *et al.*, 2014). Durante los procesos de producción de metales, en particular el caso del cobre, las emisiones al ambiente de arsénico se generan principalmente por emisiones de gas durante la etapa de fundición.

El proceso de producción de cobre de yacimientos de sulfuros comienza desde la explotación en la mina, el chancado y molienda hasta la flotación, donde se obtiene concentrado de cobre. En los depósitos de cobre el arsénico

Durante los procesos de producción de metales, en particular el caso del cobre, las emisiones al ambiente de arsénico se generan principalmente por emisiones de gas durante la etapa de fundición.

se encuentra usualmente en vetas hidrotermales en forma de tenantita ($Cu_{12}As_4S_{13}$) o enargita (Cu_3AsS_4). Estos materiales contienen un alto porcentaje de cobre (51,6% y 48,4%, respectivamente), por lo que tienden a flotar en forma similar a otros sulfuros de cobre e incrementan los niveles de arsénico dentro del concentrado final producto de la flotación.

Posteriormente el concentrado de cobre pasa a los tostadores y fundiciones donde la mayor parte es volatilizado durante el proceso, alcanzando a liberar hasta el 95% del arsénico. Los polvos de la combustión producto de la fundición contienen trióxido de arsénico (As_2O_3), el cual puede ser tratado para su comercialización. El trióxido de arsénico se utiliza principalmente en la producción de preservantes para la madera, y otros compuestos de arsénico son muy utilizados por su toxicidad en fertilizantes, fuegos artificiales, herbicidas e insecticidas. Los mayores productores de trióxido de arsénico son China (25.000 t), seguido por Chile y Marruecos con 10.000 t y 8.800 t en 2014, respectivamente (U.S. Geological Survey, 2015 y 2016). La exposición a las fuentes de arsénico es riesgosa para la salud por existir evidencias de ser un agente cancerígeno, en particular de cáncer al pulmón. Debido a esto y a las regulaciones ambientales, las fundiciones han elevado sus restricciones en la compra de concentrados imponiendo penalidades financieras cuando los productos exceden sus límites de arsénico permitidos.

NIVELES DE ARSÉNICO EN CONCENTRADOS DE COBRE Y MECANISMOS PARA ATENUAR EL IMPACTO

Como se mencionó anteriormente, la presencia del arsénico en depósitos de cobre se encuentran en la forma

de tenantita y enargita, lo que genera un producto de concentrado de cobre que puede tener altas leyes de arsénico alcanzando incluso el 4% o más. Las fundiciones se encuentran sujetas a restricciones ambientales que limitan la mezcla de productos que pueden ingresar al proceso debido a las emisiones de arsénico que se liberan al ambiente. En la **TABLA 1** se muestran los límites de emisión actuales según la regulación chilena.

TABLA 1. LÍMITES MÁXIMOS DE EMISIONES PARA FUENTES EXISTENTES

FUENTE EMISORA	As [t/año]
Altonorte	126
Caletones	130
Chagres	35
Chuquicamata	476
Hernán Videla Lira	17
Potrerosillos	157
Ventanas	48

Fuente: D.S. N° 28/2013

Dentro del Artículo N°8 del D.S. N°28/2013 se establece que para las nuevas fuentes emisoras, durante cada año calendario se puede emitir una cantidad igual o inferior al 2% en peso del Arsénico ingresado a la fuente emisora. También se definen límites máximos de concentración en el humo de las chimeneas de algunos equipos.

A pesar de que estas regulaciones varían entre países, se imponen penalidades a la compra de concentrado con alto contenido de arsénico o “sucio” debido a las restricciones ambientales. Esta situación genera que la demanda de concentrado sucio se pueda ver penalizada e incluso limitada, y con ello que no sea posible vender todo el concentrado con alta ley de arsénico.

La práctica general en la industria de fundiciones de cobre consiste en que el concentrado de cobre con ley menor a 0,2% de arsénico se vende sin penalidades. Concentrados con leyes sobre 0,2% presentan penalidades incrementales y aquellos concentrados con leyes sobre 0,5% de arsénico normalmente son rechazados (Haque *et al.*, 2012). En

algunos casos las fundiciones pueden no recibir concentrado sobre una ley máxima de arsénico en concentrado o incluso desechar concentrado si se considera que la ley de arsénico es muy elevada, tal como ocurrió en Zambia el año 2015. Debido a lo anterior, regular los niveles de arsénico es importante dentro de la producción de concentrado, o en su defecto se deben manejar posteriormente las emisiones de arsénico por otros medios para cumplir con la normativa ambiental. Para esto se han estudiado y experimentado diferentes métodos.

Un método actualmente utilizado es el uso de tostadores antes del proceso de fundición, los cuales volatilizan el arsénico presente en el concentrado. Este método ha sido utilizado en Irlanda con concentrados que contienen tenantita con niveles de hasta 4,7% de arsénico y en Chile en la minas El Indio y Ministro Hales. A pesar de ser un proceso probado que disminuye el nivel de arsénico no necesariamente resuelve todos los problemas de emisiones tóxicas asociadas a la separación de los elementos (Long *et al.*, 2012).

Otro método utilizado corresponde a la flotación selectiva de minerales posterior a la concentración tradicional. Esta flotación busca separar los compuestos con arsénico (tenantita o enargita) del resto del concentrado, generando así dos productos, un concentrado con alto contenido de arsénico y poco cobre y otro con alto contenido de cobre y poco arsénico. Los estudios realizados en cuerpos de cobre y oro en Northparkes establecen que se puede recuperar el 61% del cobre en un concentrado con menos de 2% de arsénico (Smith & Bruckard, 2007). El estudio experimental realizado con concentrado final de cobre Collahuasi muestra que se puede obtener un concentrado de alto arsénico con recuperación de arsénico de casi 72%, recuperación de cobre de 26% y la recuperación en peso de aproximadamente 21% (Méndez, 2009).

El objetivo es optimizar el proceso productivo no solo en función del cobre producido, sino que también considerando otros elementos que afectan directamente los ingresos de la empresa como el arsénico.

El proceso de flotación selectiva ha sido probado a nivel experimental pero para ser incluido en el proceso productivo real se requerirían estudios específicos. Inicialmente, una revisión de la mineralogía propia del yacimiento para determinar las características de la flotación selectiva además de incorporar los módulos necesarios para su funcionamiento en el proceso productivo (Long *et al.*, 2012). Igualmente la flotación selectiva ha demostrado ser una alternativa rentable en especial si existen restricciones de venta de concentrado sucio (Haque *et al.*, 2012).

Otro método de extracción de arsénico del concentrado consiste en precipitarlo por medio de oxidación a presión dentro de un autoclave. La extracción del arsénico requiere de un procedimiento completo para manejar y tratar el arsénico precipitado. El proceso CESL corresponde a un método hidrometalúrgico probado a nivel experimental y en plantas piloto que genera cátodos a partir de concentrado con alto nivel de impurezas (Bruce *et al.*, 2011).

Además de disminuir el nivel de arsénico en sus productos o disminuir las emisiones en fundición intentando mantener su producción de cobre por los métodos mencionados, es importante regular los niveles de arsénico desde el ingreso de mineral para la producción de concentrado. Esto puede realizarse a través de mezclas de minerales de distintos sectores de la mina (con distintas concentraciones de arsénico y cobre) de modo que el concentrado producido presente niveles aceptables de arsénico. El objetivo es optimizar el proceso productivo no solo en función del cobre producido, sino que también considerando otros elementos que afectan directamente los ingresos de la empresa como el arsénico.

EJEMPLO APLICADO: ESTRATEGIA DE ALIMENTACIÓN ÓPTIMA CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE ARSÉNICO

La sección anterior finalizó mencionando que una forma de mitigar el impacto de altas concentraciones de arsénico en el concentrado producido es modificando la secuencia de alimentación de la concentradora. El ejemplo a presentar consiste en analizar cómo puede variar una estrategia de alimentación cuando se consideran restricciones adicionales al problema de maximización de valor. En estos

casos, el objetivo ya no es solo procesar el mineral con mejor ley lo antes posible, sino que también maximizar el concentrado vendido sin penalidades. Una manera de lograr lo anterior es optimizar la estrategia de alimentación a planta, manteniendo la ley de arsénico bajo los umbrales de penalización minimizando los descuentos debido a estas. Es esto precisamente lo que busca ilustrar el caso presentado a continuación.

DEFINICIÓN DEL EJEMPLO

El ejemplo considera un periodo de análisis de 20 años, pudiendo ser alimentada la planta con tres fuentes de mineral distintas. Estas fuentes pueden ser distintos sectores de la mina o incluso, minerales provenientes de distintas minas. Cada una de estas fuentes tiene asociados perfiles de leyes de cobre y arsénico. La **TABLA 2** muestra el detalle de la extracción mina con destino a planta,

TABLA 2. DETALLE DE ALIMENTACIÓN A PLANTA

		EXTRACCIÓN								
		1			2			3		
		Tonelaje [kts]	Ley Cu [%]	Ley As [%]	Tonelaje [kts]	Ley Cu [%]	Ley As [%]	Tonelaje [kts]	Ley Cu [%]	Ley As [%]
PERIODO (AÑOS)	1	15.000	0,72	0,01	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	2	15.000	0,72	0,02	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	3	15.000	0,72	0,03	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	4	15.000	0,72	0,04	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	5	15.000	0,72	0,05	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	6	15.000	0,72	0,06	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	7	15.000	0,72	0,07	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	8	15.000	0,72	0,08	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	9	15.000	0,72	0,09	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	10	15.000	0,72	0,10	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	11	15.000	0,72	0,11	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	12	15.000	0,72	0,12	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	13	15.000	0,72	0,13	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	14	15.000	0,72	0,14	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	15	15.000	0,72	0,15	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	16	15.000	0,72	0,16	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	17	15.000	0,72	0,17	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	18	15.000	0,72	0,18	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	19	15.000	0,72	0,19	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00
	20	15.000	0,72	0,20	15.000	0,72	0,18	10.000	0,82	0,00

presentando la Extracción 1, Extracción 2 y Extracción 3, en donde cada una de estas tiene asociado un tonelaje, ley de cobre y ley de arsénico. Es importante mencionar que no necesariamente estos flujos son enviados directamente a la planta, sino que cada uno de estos minerales puede ser acumulado en un *stock* en caso de no procesarse inmediatamente.

Por otro lado, la capacidad de la planta concentradora por periodo es de 30.000 kts lo que significa que en cada periodo hay material que se debe mandar a ciertos *stocks*. El objetivo del ejemplo es comparar tres distintas estrategias de alimentación a planta, considerando y no considerando restricciones respecto al arsénico. Al apreciar la tabla anterior, la Extracción 1 presenta una ley de arsénico creciente. Por su parte, la Extracción 2 presenta

una ley de arsénico constante, y la misma ley de cobre que la Extracción 1. Finalmente, la Extracción 3 no presenta arsénico, y tiene una ley de cobre mayor que las demás. Si no existieran restricciones medioambientales, la Extracción 3 tendría prioridad sobre las demás, dado que con esto se maximiza el cobre fino producido (se supone que la recuperación de cobre y de arsénico es constante durante todos los periodos). Pero ¿qué sucede si se incorporan restricciones adicionales? Para responder esta pregunta, se definieron tres distintas estrategias de alimentación, las cuales presentan cierto *stock* inicial, presentadas en las tablas siguientes. En este caso, se denominará Alimentación *i* al mineral que es enviado directamente de la Extracción *i* o del *Stock i*.

De las **TABLAS 3, 4 Y 5** es posible decir que la Estrategia

TABLA 3. ESTRATEGIA DE ALIMENTACIÓN 1

PERIODO (AÑOS)	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-20
Alimentación 1	30%	30%	30%	33%	38%	38%
Alimentación 2	30%	30%	30%	33%	38%	38%
Alimentación 3	40%	40%	40%	34%	24%	24%

TABLA 4. ESTRATEGIA DE ALIMENTACIÓN 2

PERIODO (AÑOS)	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-20
Alimentación 1	38%	38%	38%	38%	38%	38%
Alimentación 2	38%	38%	38%	38%	38%	38%
Alimentación 3	24%	24%	24%	24%	24%	24%

TABLA 5. ESTRATEGIA DE ALIMENTACIÓN 3

PERIODO (AÑOS)	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-20
Alimentación 1	50%	50%	51%	55%	52%	45%
Alimentación 2	41%	32%	25%	5%	2%	4%
Alimentación 3	9%	18%	24%	40%	46%	51%

1 corresponde a alimentar en mayor medida con la Alimentación 3, buscando maximizar el cobre fino producido en los primeros años. Por su parte, la Estrategia 2 consiste en alimentar la planta con igual proporción de todas las alimentaciones (los porcentajes no son 33% cada una porque las extracciones son distintas). Finalmente, la Estrategia 3 corresponde a la optimización del problema, considerando que concentrado sobre ciertos umbrales presentan cierta penalización. Dicha optimización fue llevada a cabo mediante un modelo, el cual permite mantener las propiedades de los flujos de cierto periodo independientemente del periodo en que se procese. Por ejemplo, si se posterga el procesamiento de la Alimentación 3, que es la que posee menores niveles de arsénico y mayor ley de cobre, dichas leyes se mantienen en el stock y estarán disponibles para ser procesadas más adelante, cuando la ley de arsénico del concentrado sea mayor a la

permitida. Dicho en términos simples, la Alimentación 3 es usada para diluir la ley de arsénico de la demás fuentes, lo que genera que más concentrado pueda ser vendido, a pesar de postergar el procesamiento de mejores leyes al comienzo.

Con el fin de demostrar bajo qué condiciones cada estrategia es mejor, se realizaron dos análisis. El primero de ellos consiste en revisar bajo qué valores de leyes de cobre de la Alimentación 3, la Estrategia de alimentación 3 es óptima. Posteriormente se agregó una nueva variable al análisis, la ley de arsénico de la Alimentación 2, para estimar bajo qué escenarios de ley de cobre y ley de arsénico cada estrategia de alimentación es óptima.

La **TABLA 6** muestra el valor presente de los ingresos descontados netos de penalidades de cada estrategia modificando la ley de cobre de la Alimentación 3, la cual presentaba una mayor ley de cobre. Esto con el fin de

TABLA 6. COMPARACIÓN DE INGRESOS DESCONTADOS ENTRE ALTERNATIVAS LEY DE COBRE ALIMENTACIÓN 3

ESTRATEGIA LEY DE COBRE [%] ALIMENTACIÓN 3	SIN RESTRICCIÓN AMBIENTAL [MUS\$]			CON RESTRICCIÓN AMBIENTAL [MUS\$]		
	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3	Estrategia 1	Estrategia 2	Estrategia 3
0,60	11.543	11.768	11.729	7.910	7.215	10.556
0,65	11.848	11.981	11.958	8.139	7.345	10.762
0,70	12.153	12.193	12.186	8.369	7.475	10.968
0,75	12.458	12.406	12.415	8.599	7.606	11.174
0,82	12.913	12.723	12.756	8.941	7.800	11.481
0,85	13.068	12.832	12.873	9.058	7.867	11.585
0,90	13.373	13.045	13.102	9.288	7.997	11.791
1,00	13.983	13.470	13.559	9.747	8.258	12.203
1,10	14.593	13.896	14.017	10.206	8.519	12.615
1,15	14.898	14.108	14.245	10.436	8.649	12.821
2,50	--	--	--	16.635	12.172	18.380
5,00	--	--	--	28.116	18.694	28.675
7,00	--	--	--	37.300	23.912	36.911

Nota: En negrita se marca la estrategia con mayor ingreso netos descontado. En el escenario Sin Restricción no se analizaron escenarios por sobre ley de 1,15 debido a que es claro que la Estrategia 3 es siempre superior y porque leyes sobre ese nivel es poco probable de encontrar.

estimar hasta qué punto es conveniente postergar el procesamiento de esta con el fin de diluir el arsénico en los años posteriores. En relación a las penalidades, se consideró un descuento escalonado de acuerdo a la ley de arsénico. El concentrado con leyes menores a 0,5 % no está sujeto a penalidades. Entre 0,5-1,5% la penalidad es un 10% del valor de la venta, entre 1,5-2% un 15%, entre 2-3% un 20% y sobre una ley de 3 % de arsénico el concentrado no puede ser vendido.

La **FIGURA 3** muestra el perfil de leyes de arsénico en el concentrado de acuerdo a la estrategia de alimentación. Se aprecia que desde el año 10 la Estrategia 2 deja de producir concentrado vendible. A su vez, la Estrategia 1 desde el año 2013 también deja de producir concentrado vendible. Por el contrario, la Estrategia 3 durante todo el periodo produce concentrado vendible pero durante los 10 primeros años presenta mayores penalizaciones que la Estrategia 2.

En este ejemplo es posible sostener que la Estrategia 1,

la cual consiste en alimentar con mayor proporción con el mineral de mayor ley de cobre, es consistentemente mejor que las otras dos en un escenario sin restricción de arsénico. La conclusión cambia al considerar restricciones medioambientales, en donde mientras la ley de la Alimentación 3 no sea mayor a 7% (cosa imposible de ocurrir), la Estrategia 3 es la óptima.

Independientemente de los números ilustrados en el ejemplo, lo importante es sensibilizar los resultados, y tener claras ciertas reglas de decisión que pudiesen apoyar el funcionamiento de la planta concentradora. En este caso, fue posible determinar un umbral que determina qué porcentajes de alimentación generan mayores beneficios. Es posible también, como segundo análisis, sensibilizar la toma de decisiones no solo a la ley de cobre de la Alimentación 3, sino que también a la ley de arsénico de la Alimentación 2. En este caso se tendrá una combinación de ley de cobre y ley de arsénico, para los cuales cierta

FIGURA 3. EVOLUCIÓN DE LEYES DE ARSÉNICO EN EL CONCENTRADO SEGÚN ESTRATEGIA

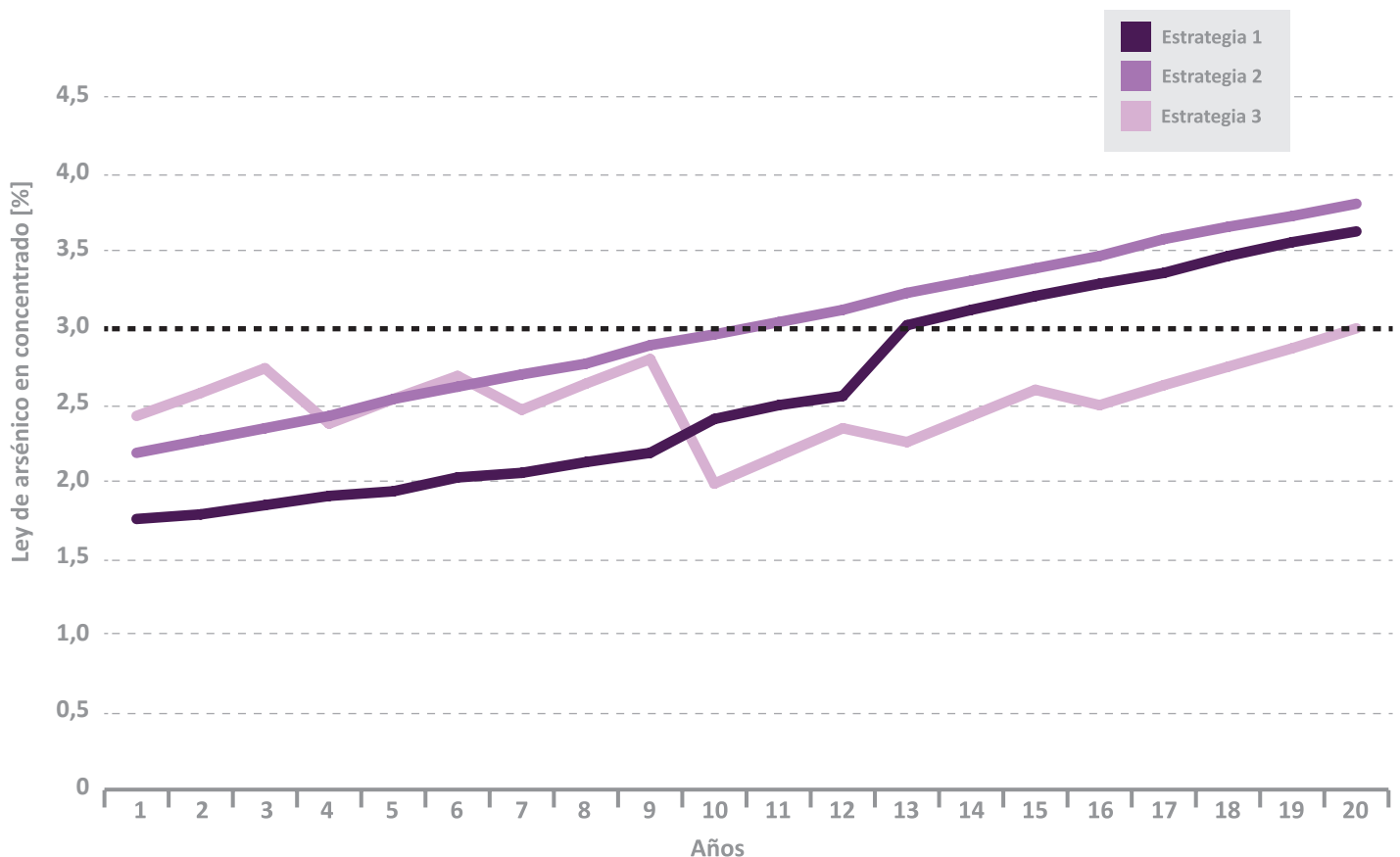


TABLA 7. ESTRATEGIA DE ALIMENTACIÓN ÓPTIMA SEGÚN LEY DE COBRE Y ARSÉNICO

LEY DE AS [%]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	
LEY DE COBRE [%]	0,6	Estr 1	Estr 1	Estr 1	Estr 3	Estr 3
	0,7	Estr 1	Estr 1	Estr 1	Estr 3	Estr 3
	0,8	Estr 1	Estr 1	Estr 1	Estr 3	Estr 3
	0,9	Estr 1	Estr 1	Estr 1	Estr 3	Estr 3
	1,0	Estr 1	Estr 1	Estr 1	Estr 3	Estr 3
	1,1	Estr 1	Estr 1	Estr 2	Estr 3	Estr 3
	1,2	Estr 2	Estr 1	Estr 2	Estr 3	Estr 3

estrategia resulta ser mejor que las demás, generando un plano de estrategias óptimas. Dicho análisis queda reflejado en la **TABLA 7**, la cual muestra la estrategia óptima dependiendo de la ley de cobre de la Alimentación 3 y la ley de arsénico de la Alimentación 2.

En base a la **TABLA 7** es posible establecer que enviar a planta mayor proporción del mineral de mayor ley de cobre y sin arsénico es lo óptimo si la ley de arsénico de la Alimentación 2 es menor a 0,10%. Si la ley de arsénico de esta es mayor a 0,15%, lo óptimo ya no es procesar el mineral de mayor ley de cobre al comienzo, sino que postergar dicha producción y diluir la ley de arsénico en los años futuros.

Al igual que en el análisis anterior, más allá del valor umbral encontrado, lo importante es realizar optimizaciones que deriven reglas de decisión que permitan tomar decisiones

Lo óptimo ya no es procesar el mineral de mayor ley de cobre al comienzo, sino que postergar dicha producción y diluir la ley de arsénico en los años futuros.

a medida que se van observando las leyes, o se tenga cierta certeza de cómo estas evolucionarán. En este ejemplo no se considera el factor precio, ni costos, lo cuales también poseen un rol importante a la hora de establecer la mejor estrategia en base a la determinación de umbrales que guíen la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Las emisiones de arsénico producto de la obtención de cobre es un tema de suma relevancia para las fundiciones debido a sus implicancias medioambientales. Más aún, debido al aumento del cobre producido a través de concentrados es importante que las empresas mineras y fundiciones tengan presente qué mecanismos pueden tomar para evitar sufrir penalidades en su concentrado, o que simplemente no lo puedan vender. Esta Perspectiva revisó algunas de las alternativas existentes, y mostró a través de un ejemplo sencillo, cómo pueden cambiar las estrategias de consumo de mineral al considerar restricciones medioambientales al momento de realizar una optimización en los flujos de alimentación a la planta concentradora. Más allá de los valores presentados, la idea principal es promover la generación de reglas de decisión que permitan mejorar

la gestión del funcionamiento de plantas y/o fundiciones, modificando aguas arriba los procesos obteniendo mejores resultados. En este caso, al considerar restricciones al contenido de arsénico se mostró que lo óptimo puede no ser alimentar la planta con mejores leyes de cobre, sino que buscar mantener una ley de arsénico en el concentrado que maximice el concentrado producido con niveles mínimos de penalizaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Bruce, R., Mayhew, K., Mean, R., Kadereit, H., Nagy, A. and Wagner, O., 2011. Unlocking Value In Copper Arsenic Sulphide Resources With The Copper–Arsenic CESL Technology. *En Hydro-copper Conference Proceeding*.
- D.S. N° 28/2013. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 12 de diciembre de 2013.
- Haque, N., Bruckard, W. and Cuevas, J., 2012. A techno-economic comparison of pyrometallurgical and hydrometallurgical options for treating high-arsenic copper concentrates. *XXVI International Mineral Processing Congress, New Delhi, India*.
- Long, G., Peng, Y. and Bradshaw, D., 2012. A review of copper–arsenic mineral removal from copper concentrates. *Minerals Engineering*, 36, pp.179-186.
- Mandal, B.K. and Suzuki, K.T., 2002. Arsenic around the world: a review. *Talanta*, 58(1), pp.201-235.
- Martin, R., Dowling, K., Pearce, D., Sillitoe, J. and Florentine, S., 2014. Health effects associated with inhalation of airborne arsenic arising from mining operations. *Geosciences*, 4(3), pp.128-175.
- Méndez Muñoz, E.G., 2009. Flotación Selectiva de Enargita desde un Concentrado Final de Sulfuros de Cobre de Collahuasi. Disponible en http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mendez_e/sources/mendez_e.pdf
- Minería Chilena, 2015. Zambia ordena desechar cobre que importó de Chile por niveles de arsénico. Revista Minería Chilena. Revisado en <http://www.mch.cl/2015/09/14/zambia-ordena-desechar-cobre-que-importo-de-chile-por-contener-altos-niveles-de-arsenico/>
- Smith, L.K. and Bruckard, W.J., 2007. The separation of arsenic from copper in a Northparkes copper–gold ore using controlled-potential flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1), pp.15-24.
- U.S. Geological Survey, 2015. Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey, 21 p.
- U.S. Geological Survey, 2016. Mineral commodity summaries 2016: U.S. Geological Survey, 27 p.

VALENTINA CHICO

Ingeniero Civil Industrial con Mención Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

vhico@gem-ing.cl

CHRISTIAN LICHTIN

Ingeniero Civil Industrial mención Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Diploma en Economía de Minerales de la Universidad de Chile

clichtin@gem-ing.cl

NO TAN RAROS

Por Juan Ignacio Guzmán

En la última década la industria minera se ha vuelto consciente de un grupo especial de metales conocido como *tierras raras*. Tierras raras es el nombre común de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio).

Aunque la mayoría de las personas jamás ha escuchado hablar de ellos, de forma creciente estamos cada vez más expuestos a estos elementos en nuestra vida cotidiana. De hecho, en la actualidad prácticamente toda las aplicaciones de alta tecnología incorporan en alguna cantidad tierras raras. Así por ejemplo, discos duros, *smartphones*, televisores planos y monitores, así como baterías recargables, utilizan todos alguna cantidad de uno o varios elementos de este grupo.

Hasta fines de la década pasada China producía prácticamente la totalidad de las tierras raras del mundo, llegando a representar en 2009 alrededor del 97% de la producción mundial. Aprovechándose de su posición monopólica en el mercado, y de la criticidad de estos metales en la manufactura de variadas aplicaciones de primera relevancia estratégica, el gobierno chino instauró en 2009 cuotas de exportación con objeto de restringir en la práctica la manufactura de estos bienes finales fuera

de China (la razón dada por el gobierno aludió, sin embargo, a una mayor regulación medioambiental más que a prácticas ligadas a la protección de su industria manufacturera). Lo concreto es que la imposición de dichas cuotas no hizo más que abrir el apetito a la exploración y desarrollo de proyectos mineros fuera de China, a tal punto que en 2015 se estima la producción del gigante asiático representó alrededor del 85% del total mundial y se espera este porcentaje continúe bajando en los próximos años.

De esta forma, las tierras raras se están volviendo cada vez más comunes, como lo muestran tres libros recientes. El primero de ellos, Voncken (2016), presenta una síntesis escrita para un público especialista en minería. En este breve libro se describe la historia del descubrimiento de los distintos elementos que conforman la lista de tierras raras, así como presenta los minerales y minas desde donde estos son explotados. También se discuten las propiedades físicas y químicas que hacen de las tierras raras elementos tan críticos en la manufactura de aplicaciones modernas. En resumen, Voncken (2016) es una excelente introducción técnica para el lector que busca entender más de la economía, geología, minería y procesamiento de las tierras raras.

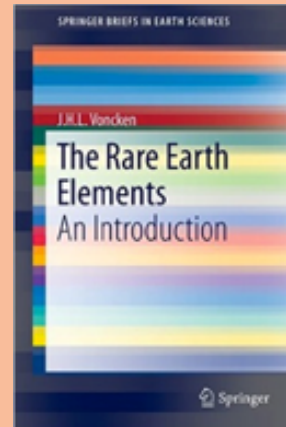
Para todo espectador un libro recomendado es el de Abraham (2015), el cual cuenta con una extensa crítica internacional. En este, el autor traza de manera pedagógica y documental el camino de estos elementos desde la mina hasta el consumidor final.

Abraham (2015) demuestra que estos elementos están de forma creciente ganando participación y significancia en el contexto internacional, otorgando a las compañías y países que los producen y comercializan una ventaja estratégica para asegurarles de forma sustentable una participación en la manufactura moderna y del futuro.

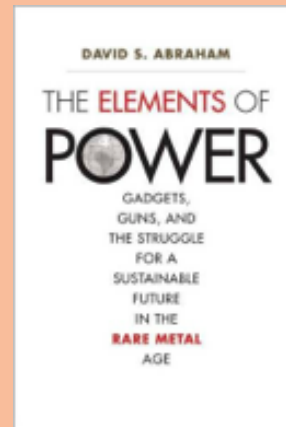
Finalmente, y para el lector especialista en metalúrgica extractiva, en la segunda edición de un clásico en la materia Krishnamurthy y Gupta (2016) actualizan su libro de 2004 incorporando los principales desarrollos del área en la última década. Como destacable, y producto del mayor uso de estos *commodities* en el pasado reciente, esta nueva edición incluye un capítulo completo del reciclaje de las tierras raras desde magnetos, baterías y otros bienes finales.

El creciente interés por las tierras raras en el pasado reciente y su potencial rango de aplicación en el futuro convierten a este grupo de metales en uno de los de mayor crecimiento en cuanto a demanda. Esto le ha permitido a la oferta mantener altas expectativas para asegurar el abastecimiento de los requerimientos futuros, lo que ha gatillado alrededor del mundo una “fiebre por las tierras raras”. De esta forma, y como los tres libros que se revisan sugieren, es probable que en el futuro estos elementos ya no sean tan *raros*.

REFERENCIAS



The Rare Earth Elements: An Introduction
J.H.L. Voncken
Springer, 2016
127 págs.



The Elements of Power: Gadgets, Guns, and the Struggle for a Sustainable Future in the Rare Metal Age
D. Abraham
Yale University Press, 2015
336 págs.



Extractive Metallurgy of Rare Earths, 2a Edición
N. Krishnamurthy y C.K. Gupta
CRC Press, 2016
869 págs.

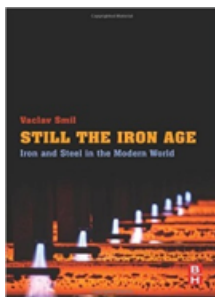
NO TAN RAROS.

ÚLTIMOS LIBROS

ÚLTIMOS ARTÍCULOS

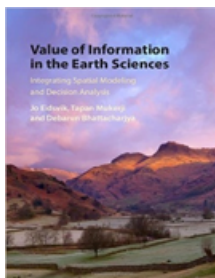
Still the Iron Age: Iron and Steel in the Modern World

Vaclav Smil
Butterworth-Heinemann, 2016
280 págs.



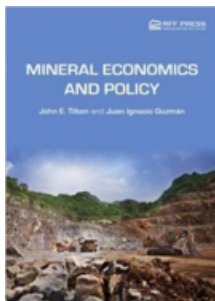
Value of Information in the Earth Sciences: Integrating Spatial Modeling and Decision Analysis

Jo Eidsvik, Tapan Mukerji y
Debarun Bhattacharjya
Cambridge University Press, 2016
396 págs.



Mineral Economics and Policy

J.E. Tilton y J.I. Guzmán
Resources for the Future, 2016
270 págs.



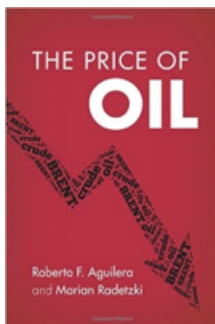
Mineral Resources, Economics and the Environment 2nd Edition

S.E. Kesler y A.C. Simon
Cambridge University Press,
2a Edición, 2016
446 págs.



The Price of Oil

R.F. Aguilera y M. Radetzki
Cambridge University Press, 2015
252 págs.



ECONOMÍA

- Rawashdeh, R. Xavier-Oliveira, E. y Maxwell, P. (2016). The potash market and its future prospect. *Resources Policy*, Vol. 47, 154-163.
- Redlinger, M. y Eggert, R. (2016). Volatility of by-product metal and mineral prices. *Resources Policy*, Vol. 47, 69-77.
- Zhao, L., Zhang, X., Wang, S. y Xu, S. (2016). The effects of oil price shocks on output and inflation in China. *Energy Economics*, Vol. 53, 101-110.

GEOCIENCIAS

- Miao, S.-J., Cai, M.-F., Guo, Q.-F. y Huang, J. (2016). Rock burst prediction based on in-situ stress and energy accumulation theory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 83, 86-94.
- Shiers, D.W., Collinson, D.M., Kelly, N.J. y Watling, H.R. (2016). Copper extraction from chalcopyrite: Comparison of three non-sulfate oxidants, hypochlorous acid, sodium chlorate and potassium nitrate, with ferric sulfate. *Minerals Engineering*, Vol. 85, 55-65.
- Talebi, H., Sabeti, E., Azadi, M. y Emery, X. (2016). Risk quantification with combined use of lithological and grade simulations: Application to a porphyry copper deposit. *Ore Geology Reviews*, Vol. 75, 42-51.
- Williamson, B.J., Herrington, R.J. y Morris, A. (2016). Porphyry copper enrichment linked to excess aluminium in plagioclase. *Nature Geosciences*, Vol. 9, NA.
- Zhang, P., Peterson, S., Neilans, D., Wade, S., McGrady, R. y Pugh, J. (2016). Geotechnical risk management to prevent coal outburst in room-and-pillar mining. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 148, 9-18.

MINERÍA Y PROCESAMIENTO

- Choubey, P., Kim, M., Srivastava, R., Lee, J.-C. y Lee, J.-Y. (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, Vol. 89, 119-137.
- Weerasekara, N.S., Liu, L.X. y Powell, M.S. (2016). Estimating energy in grinding using DEM modelling. *Minerals Engineering*, Vol. 85, 23-33.



ECONOMÍA DE MINERALES

10-11 Agosto 2016

INSCRIPCIONES ABIERTAS

10% DCTO.

hasta el 20-05-16

CARLOS HINRICHSEN
Gerente de Desarrollo de Negocios
chinrichsen@gem-ing.cl
22 225 3021

www.gem-ing.cl

