

## Problemas operativos asociados al desarrollo de algas y cianobacterias en sistemas de agua en minería: Uso de agua de mar en procesos industriales

Leandro Herrera, Ph.D.  
Xpert Ingeniería y Producción S.A.  
Documento en desarrollo (Beta v 0)

1

### CONTENIDO

Introducción.....	2
Los problemas operativos.....	2
Características de las algas .....	3
El medio de crecimiento.....	4
Cianobacterias .....	4
Medidas preventivas útiles.....	5
Sulfato de cobre.....	5
Eutroficación.....	5
Fuente de energía .....	5
Reactivos fungicidas.....	6
Restricción de inóculo.....	6
Análisis de aguas.....	6
Densidad de fotosintetizadoras .....	7
Medición de fosfato .....	7
Instalación de la campaña de medición .....	7

## INTRODUCCIÓN

La gran minería chilena, principalmente de cobre y molibdeno, desde hace unos 100 años ha buscado soluciones novedosas para suplir las necesidades de agua para sus procesos. La falta de agua dulce, limpia, se hace sentir cada vez más agudamente, sobre todo en el norte de Chile, sitio de ubicación de grandes yacimientos pero, simultáneamente, sitio del desierto más seco del planeta.

Entre las múltiples soluciones estudiadas, figura en lugar preponderante el reciclaje de aguas de proceso (recuperación de aguas claras de los relaves), la flotación con agua de mar limpia, la desalinización de aguas por diversas tecnologías (incluida la osmosis inversa, a pesar de su tremendo consumo de potencia), etc.

2

Uno de los procesos que requiere aguas en grandes cantidades es la flotación de sulfuros y el transporte de concentrados a puerto. Estas operaciones se pueden realizar con agua de mar, naturalmente, pero aparecen nuevos problemas operativos que necesitan solución oportuna a fin de evitar paradas operacionales u otras formas de pérdida económica. El problema operativo que se discute a continuación se relaciona con el desarrollo de algas, microalgas y cianobacterias en los equipos y piping de las operaciones. Este desarrollo de biomasa tiene el efecto de agregar orgánicos indeseados, reducir el diámetro efectivo de los ductos, reducción del tiempo libre de operación de filtros y modificar los tiempos de residencia en las operaciones que dependen de la sedimentación, por cambio en la densidad media de sólidos.

Dadas las características de los secretos industriales y las dificultades asociadas a los eventuales impactos ambientales, no existe información precisa de los problemas operativos asociados al agua de mar en procesos mineros, de modo que sólo es posible discutir aquí en abstracto. Esta discusión en ausencia de parámetros de evaluación económica de los impactos asociados, dificulta una discusión seria de las necesidades de incorporar la remediación en las etapas tempranas de ingeniería; sin embargo, como se verá, es posible proveer suficientes elementos científicos, técnicos y/o empíricos como para resolver en qué situación se encuentra la ingeniería de fundamentos de uno u otro proyecto de inversión, relacionado a la flotación, transporte u otros procesos, con agua de mar (u otras fuentes de agua que contengan especies de nitrógeno inorgánico y especies de fósforo, en relaciones másicas específicas).

## LOS PROBLEMAS OPERATIVOS

Al utilizar agua de mar en el procesamiento de minerales se observa la pronta aparición de macro algas (algas visibles a simple vista, a diferencia de las micro algas que son microscópicas). En el caso chileno, suele abundar el pelillo (*Gracilaria chilensis*), aunque hay más de dos docenas de algas identificadas en las aguas marinas chilenas.

El pelillo se adhiere en forma natural a casi cualquier superficie disponible (se exceptúan algunas superficies poliméricas específicas). Ciertamente se puede adherir al concreto, arena, rocas, hierro, acero, PVC (sobre todo usado, es decir, con rayas superficiales o mugres adheridas previamente) y la mayor parte de los materiales utilizados en procesos. Una vez desarrollado, el pelillo se desprende a pedazos de unos pocos centímetros que bloquean instrumentos (se enreda en el rodete de algunos flujómetros, por ejemplo), se atascan en espacios de poco flujo (intersticio de las placas orificio, reducciones bruscas, parte posterior de válvulas check, lado interno de codos, etc.) y modifican las propiedades superficiales de las cañerías y equipos. La adherencia, en todo caso, es una propiedad



común de muchas algas, bacterias, hongos, etc. En la imagen adjunta<sup>1</sup> se observan algas comunes adheridas a rocas, para ilustrar la densidad que llegan a tener las algas del tipo pelillo.

Uno de los problemas más preocupantes es el eventual desarrollo de cianobacterias (bacterias fotosintetizadoras), porque algunas especies producen toxinas de muy alto poder.

### CARACTERÍSTICAS DE LAS ALGAS

3

Una revisión muy sucinta, sin pretender explicitar toda la biología de algas, permitirá

describir cómo se producen los problemas operativos que se discuten y, sobre todo, los recursos disponibles para el diseño conceptual de ingeniería que evite los problemas asociados. Para estudiar en mayor detalle las [algas](#) y las [cianobacterias](#) existen textos y fuentes en la Internet.

En primer lugar, es importante adoptar una definición operativa de los seres vivos. Diremos que los seres vivos se caracterizan (entre otras propiedades) por producirse a si mismos a partir de materia más simple que la que sintetizan. Para esta producción se requiere energía, que se obtiene de fuentes específicas. Todas las formas de vida conocidas hasta la fecha se basan en moléculas de carbono, de alto peso molecular.

Así, se pueden adoptar varias clasificaciones de los seres vivos, sea en base a las formas de energía que utilizan y en base a la forma de las moléculas que pueden utilizar para obtener el carbono necesario para producirse a si mismos.

Aquellas formas vivas que utilizan formas orgánicas como fuente de carbono, y de energía se les llama heterótrofos; los mamíferos somos un ejemplo de heterótrofos, pero hay muchísimas formas de vida heterótrofa, incluidas bacterias, hongos, insectos, etc. Aquellas formas de vida que NO requieren orgánicos, sino que adquieren el carbono de fuentes inorgánicas (dióxido de carbono, carbonatos, bicarbonatos) se llaman autótrofas. Entre los ejemplos más conocidos en minería figuran bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans*, que obtiene el carbono de carbonatos o de dióxido de carbono o los vegetales que utilizan el dióxido de carbono atmosférico (existen muy diversas formas de autotrofia). Los autótrofos operan con dos fuentes energéticas, conformando dos clasificaciones distintas. Los autótrofos que obtienen energía de la luz (algas, plantas cianobacterias, etc.) son llamados fotoautótrofos o fotosintetizadores. Los autótrofos que obtienen energía mediante reacciones de óxido reducción (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Desulfatomaaculum autotrophicum*, etc.) son conocidos como quimoautótrofos o litotróficos.

Las algas son formas vivas fotoautótrofas que, como cualquier otro ser vivo, dependen de un flujo material y energético, de características específicas a la especie. Desde un punto de vista simplificado, el inventario de átomos de un alga contendrá carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fosfato, manganeso, hierro, azufre y muchísimas otras especies pero en menor cuantía. Su desarrollo depende, naturalmente, de que **todos** estos átomos se encuentren

---

<sup>1</sup>En línea <http://www.conama.cl/gefmarino/1307/article-38907.html> 16 de Enero 2008.

presentes en moléculas específicas, que formen parte de las opciones metabólicas (es decir, cuyas reacciones químicas formen parte del repertorio del ser vivo) del alga en cuestión.

En las algas, en buenas cuentas, la energía luminosa (fotones) se transforma en energía química (enlaces carbono, por ejemplo). Naturalmente, para llevar 6 moles de dióxido de carbono a un mol de glucosa se requiere aportar más que la energía de enlace necesaria, de 2.800 KJ (si eficiencia fuese 100%). Este aporte, en el caso de la fotosíntesis, se obtiene de la luz, habitualmente de la luz solar. La estequiometría de la síntesis de glucosa desde dióxido de carbono muestra que se producen, además, 6 moles de oxígeno molecular gaseoso (que se produce en fase acuosa, en realidad, pero que es luego transferido a la atmósfera gaseosa). Puede ser prudente advertir que el almidón es el producto principal de la fotosíntesis, pero el modelo glucosa es útil porque es el monómero del almidón. Naturalmente, durante la ausencia de luz (como en la noche) los seres vivos fotosintetizadores siguen activos, pero revierten su metabolismo al mecanismo heterótrofo, es decir, consumen glucosa (su propio almidón en realidad) y oxígeno gaseoso para producir dióxido de carbono. La presencia de oxígeno en la atmósfera del planeta se debe a que el consumo nocturno de oxígeno es menor que la producción diurna debido, entre otras cosas, al efecto de la disminución de la temperatura nocturna sobre la cinética de las reacciones químicas (tipo Arrhenius).

4

Una característica importante de las algas es que NO requieren carbono y que SI requieren fósforo (habitualmente en la forma de fosfato) y nitrógeno (habitualmente amonio, nitrito o nitrato, aunque pueden también utilizar nitrógeno gaseoso atmosférico). Otra característica importante es que una alta tensión de corte en el medio fluido impide el buen desarrollo de algas macroscópicas. También se debe destacar que en condiciones de abundante fósforo y aguas quietas se observa el fenómeno del "florecimiento" de algas, en que se desarrollan súbitamente grandes cantidades de algas, típicamente en lagos.

Así, en una operación en que se utilice agua rica en los compuestos necesarios para una forma de vida y que disponga de la fuente de energía necesaria podría existir un pequeño número de seres vivos competentes que se desarrollen en el tiempo. La presencia de seres inicial se requiere porque no suele aparecer una forma particular de vida sino a partir de un ser previo que se reproduce. Esta pequeña dosis inicial suele recibir el nombre de inoculo.

## EL MEDIO DE CRECIMIENTO

El agua de mar es, evidentemente, rica en moléculas útiles para las algas (puesto que empíricamente se constata que existen algas en el mar). Similarmente, donde quiera que se tome una muestra de agua de mar, ésta contendrá cientos (o miles) de especies vivas microscópicas, que pueden dar lugar a especie macroscópicas (la espora del pelillo es microscópica). Así, al usar agua de mar se estará usando agua rica en nutrientes y con inoculo disponible.

En el mar no se desarrollan habitualmente grandes masas de algas macroscópicas a menos que se provean, utilizando técnicas específicas, las condiciones para el desarrollo en grandes masas. Parte de las razones es la falta de soporte de adherencia, la escasa penetración de la luz, la falta de fosfato y las tensiones de corte de la marea. Sin embargo, en regiones de alta contaminación y/o bajo oleaje (playas planas) se observa florecimiento algal cíclico, en función de la temperatura de las aguas. Es la calidad de las aguas y la temperatura quienes regulan, en el medio natural, la densidad del desarrollo de algas.

## CYANOBACTERIAS

Existen, además de las algas microscópicas, bacterias microscópicas fotoautótrofas. La gran diferencia entre algas y cianobacterias es que las algas son seres vivos de mayor complejidad que las bacterias; las algas incorporan una membrana nuclear que aísla el material genético respecto del medio celular interno (citósol) y son del género

eucariota; las bacterias son estructuralmente mucho más simples porque no tienen membrana nuclear, asunto que las define como procariote.

Las cianobacterias son capaces de utilizar luz solar como fuente de energía, con mecanismos similares a las algas y las plantas. Las cianobacterias son bastante más peligrosas que las algas pues algunas especies pueden producir toxinas de muy alto impacto para los seres vivos superiores, en particular para aves y mamíferos, incluyendo a los seres humanos. La ingesta de este tipo de toxinas produce enfermedades agudas que pueden llevar a la muerte de los seres que ingestan la toxina. No es aquí del caso especificar el mecanismo de síntesis de la toxina (que es complejo y que muchas veces depende de que la cianobacteria del caso sea portadora de un virus específico) pero se debe tener presente que cuando se observa el desarrollo de algas, es prudente considerar el eventual desarrollo de cianobacterias y sus toxinas, sobre todo si las aguas tendrán contacto humano.

5

## MEDIDAS PREVENTIVAS ÚTILES

### SULFATO DE COBRE

Entre las formas más convencionales para evitar el desarrollo de algas y/o cianobacterias en instalaciones de escala industrial, como la producción de agua potable, destaca la dosificación de sulfato de cobre, que es un conocido algistático (en alta concentración puede ser algicida). Esta alternativa no es muy útil en minería porque se trata aquí de flotar minerales de cobre, de modo que es posible que el cobre en solución intervenga en procesos posteriores y se debe también tener en cuenta la mayor corrosividad de las aguas si se les agrega cobre.

### EUTROFICACIÓN

Desde el punto de vista de la protección ambiental, interesa de sobremanera evitar el desarrollo de algas en abundancia en cuerpos lacustres útiles. Se destacó antes que este fenómeno es conocido como explosión o “florecimiento” de algas y que su incidencia se debe a una riqueza de nutrientes (eutroficación de lagos), particularmente abundancia de fosfato y nitrógeno. En este caso, las medidas son de más largo plazo y consisten en evitar que lleguen aguas eutróficas a los lagos que se deben proteger (plantas de tratamiento de aguas servidas, conducción de aguas servidas hacia puntos más abajo del cuerpo lacustre, etc.). Esta medida no es útil para la utilización de aguas de mar porque el control de descargas suele estar fuera del alcance de un proyecto de ingeniería (particularmente porque sus efectos se pueden observar recién después de varios años, excediendo los plazos del análisis convencional de rentabilidad). Sin embargo, es útil destacar que la medida preventiva de evitar la llegada de fosfato en particular (y compuestos de nitrógeno también), evita el desarrollo de algas y cianobacterias.

Es posible encontrar aguas marinas en que no abunda el fosfato y que son, por tanto, un mal soporte para el desarrollo de fotosintetizadoras. Estos sitios son cada vez menos comunes porque las actividades humanas, urbanas e industriales, tienden a eutroficar todas las aguas del planeta; sin embargo, si existiese la alternativa de captar las aguas en localidades de distinto contenido de fosfato, se elegirá evidentemente aquella con menor contenido.

Finalmente, se debe considerar que la remoción físico química de fosfato es factible utilizando cloruro férrico como coagulante, pero la experiencia de evaluación económica indica su poca factibilidad comparativa con otras formas de contención del problema operativo asociado a las algas.

### FUENTE DE ENERGÍA

Dado que las algas y cianobacterias son fotoautótrofas, es evidente que si se impide la llegada de luz a las aguas portadoras se podrá impedir su desarrollo. Debemos advertir que esta operación corre un riesgo asociado a las condiciones anaerobias (sin oxígeno); tal es, que las cianobacterias pueden generar toxinas en condiciones anaerobias y que los orgánicos asociados a la carga inicial de algas podrían dar origen a reacciones de fermentación desagradables; por ende, se deben cubrir todos los estanques y cisternas, canales, etc. pero considerar que se incorpore aire en forma regular.

También es útil considerar la posibilidad de disminuir el tiempo de residencia de las aguas en puntos de alta irradiación y quietud mediante un diseño hidráulico que evite la instalación de lagunillas o estanques abiertos (que habitualmente se usan para manejar las presiones hidráulicas). La posibilidad de usar sistemas de bombeo según requisito, con sistemas modernos de control (variadores de frecuencia) ayudará, también, a reducir la irradiación de estas aguas, reduciendo o eliminando la posibilidad de que las fotosintetizadoras tengan acceso a su fuente de energía.

### REACTIVOS FUNGICIDAS

Es poco probable que se logre encontrar un reactivo fungicida que no implique un enorme costo debido a los grandes caudales asociados. Además, se debe cuidar que los fungicidas del caso no interfieran con las operaciones en que se utilizará el agua transportada (como el sulfato de cobre).

### RESTRICCIÓN DE INÓCULO

Es también el caso que si no existen algas ni bacterias en las aguas transportadas, entonces no se desarrollarán algas en el sistema de transporte. Esta estrategia requiere buenas técnicas de separación que logren retener estas especies microscópicas y devolverlas a su fuente (al mar) de manera que a las instalaciones no lleguen algas ni cianobacterias que pudiesen desarrollarse aguas arriba. Esta alternativa es muy atractiva pues es estrictamente física y solo retiene las especies biológicas y las devuelve a su fuente. Desgraciadamente, la filtración de materiales micrónicos suele ser de gran costo (operaciones de ultrafiltración) y las alternativas de floculación y sedimentación no son tan eficientes como para evitar los ultrafiltros, además de los costos del impacto ambiental generado por los reactivos.

Naturalmente, es posible encontrar lugares en que la densidad de fotosintetizadoras sea pequeña (aguas más prístinas). Particularmente, si se analizan las aguas profundas se observará que la densidad de fotoautótrofas disminuye, dependiendo de la transparencia de las aguas, de las corrientes que podrían mezclar las aguas superficiales con las profundas y otros fenómenos de decantación de esporas, que es menos común. De ser el caso, se debiera medir la densidad de fotosintetizadoras antes de decidir los puntos de captación de aguas que deben ser transportadas a flotación u otros usos (transporte de mineral, en particular).

### ANÁLISIS DE AGUAS

En el caso del Norte de Chile se debiera estudiar la densidad de fotosintetizadoras y la concentración de fosfato en los puntos alternativos de captación. La primera porque permitiría evaluar la presencia actual de algas y asociarle una expectativa o probabilidad de desarrollo posterior. La segunda porque indicará la capacidad de las aguas para proveer los elementos necesarios para el desarrollo de algas.

## DENSIDAD DE FOTOSINTETIZADORAS

La densidad de especies fotosintetizadoras puede ser estimada por muy variados métodos, pero la medición de la clorofila medida en las aguas<sup>2</sup> ofrece la medición más confiable, directa y útil. Esta densidad (de algas) cambiará conforme se profundice el punto de captación debido al coeficiente de extinción de luz<sup>3</sup> que tenga el agua.

El análisis de clorofila puede ser muy sensible si se utilizan métodos de fluorescencia. La sensibilidad es suficiente para evitar el método más antiguo, que requiere filtrar varios metros cúbicos para aumentar la densidad de fotosintetizadoras hasta el punto en que se pueda medir clorofila por análisis químico. Los sensores en línea suelen ser costosos pero están disponibles en el mercado, de modo que es posible pensar en una embarcación pequeña que recorre los sitios de captación y que mide, instantáneamente, la concentración de clorofila a distintas profundidades<sup>4</sup>. Se dispone así de un mapa de curvas de nivel de clorofila que será útil para la definición de la captación.

7

## MEDICIÓN DE FOSFATO

En cuanto a la concentración de fosfato, es poco esperable que ésta cambie en cortas distancias<sup>5</sup>, debido a los fenómenos de mezcla en las aguas, sea por difusión o por convección; pero, si las mediciones abarcan distancias de algunos cientos de metros, se debe contemplar la posibilidad de cambio del fosfato.

## INSTALACIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN

La medición de clorofila en los puntos alternativos de captación requiere resultados que correspondan a latitudes / longitudes / profundidades del sector disponible. Se utiliza, naturalmente, una embarcación pequeña, adecuada a las condiciones del lugar (vientos, oleaje, corrientes, etc.). La embarcación se utiliza para deslizar un electrodo multiparamétrico, que mediría clorofila (en sus diversas formas) y batimetría (además suelen medir oxígeno disuelto, temperatura, turbiedad, conductividad, etc.)

Alternativamente, la embarcación se utiliza para tomar muestras mediante un tubo marcado en profundidad y una bomba de desplazamiento positivo (o, al menos, de flujo conocido, en el orden de 1 L/min) para coleccionar muestras (5 L) de aguas de profundidades reguladas y llevar luego a laboratorio (dentro de plazos que no excedan el orden de una hora, o se utilizarán reactivos para conservación de la muestra). La bomba de desplazamiento positivo podría también usarse directamente para la primera etapa de la medición de clorofila, tal es, la captura en un filtro de pequeña porosidad, en cuyo caso los plazos son más extensos.

La medición de fosfato requiere la toma de muestras de similar manera.

---

<sup>2</sup> Es también posible medir la concentración de proteínas o de cualquier otro componente intracelular, ADN, fosfato, nitrógeno orgánico (Kjehldal), etc pero estos compuestos tienen interferencias más fuertes que la medición de clorofila.

<sup>3</sup> la profundidad de media extinción cambia desde un medio metro hasta decenas de metros, según cuán prístina sea el agua del punto de observación

<sup>4</sup> Ver, p.e. <http://www.bbe-moldaenke.de/fluoroprobe.html>

<sup>5</sup> las especies químicas disueltas tienden a la homogeneidad, mientras que los seres vivos disponen de mecanismos de movilidad, de control de densidad, etc

Para la campaña de medición se debería disponer de un laboratorio cercano para analizar clorofila y fosfato. Naturalmente, en las condiciones típicas de campaña se utilizan equipos portátiles que son también de alto costo pero mucho más disponibles que el electrodo de clorofila, al punto de poder arrendarlos para una campaña específica. Los reactivos están disponibles en el mercado, de modo que éste aspecto no presenta limitaciones. La experiencia muestra, nuevamente, que la mejor solución suele ser la instalación de un laboratorio durante el periodo de las mediciones. Un período inicial de una semana debería ser suficiente como para caracterizar el sitio y resolver si se requieren mediciones en otro período o si la medición es suficientemente definitiva.