

Empleo de microalga *scenedesmus obliquus* en la eliminación de cromo presente en aguas residuales galvanicas(*)

A. Pellón*, F. Benítez*, J. Frades**, L. García**, A. Cerpa*** y F.J. Alguacil****

Resumen

El vertido de aguas residuales con alto contenido de cromo, procedentes de las industrias galvanoplásticas, es un peligro potencial que se le presenta a la población y al medio ambiente. Se conoce que algunos metales, incluyendo los pesados, a concentraciones bajas participan en diferentes rutas metabólicas, pero en altas concentraciones pueden ser tóxicos para muchos organismos vivos. Algunos microorganismos toman los metales pesados del medio ambiente, siendo capaces de concentrar y acumular grandes cantidades de los mismos en diferentes estructuras citoplasmáticas, sin que lleguen a ocasionar efectos tóxicos en los mismos. Las microalgas son un ejemplo de este comportamiento, ya que tienen afinidad por los metales polivalentes, de ahí la posibilidad de su aplicación como agentes descontaminantes en aguas que contengan iones metálicos disueltos como método alternativo cuando no se pueda utilizar otro método de recuperación. En este trabajo se realizó un estudio de eliminación de cromo presente en las aguas residuales galvanicas, empleando un cultivo de *scenedesmus obliquus*. Se obtuvo una eficiencia de eliminación de Cr (VI) del 12 % y del 27 % para el Cr (III), y en condiciones de inmovilización del alga fue del 95 % para el Cr (III).

Palabras clave

Galvanicas. Tratamiento de aguas residuales. Recuperación cromo. Microalgas.

Using microalgae *scenedesmus obliquus* in the removal of chromium present in plating wastewaters

Abstract

Dumping wastewaters from plating industry with a high content in chromium is a potential hazard for people and environment. It is known that some metals, including the heavy metals, at low concentrations participate in different metabolic routes, but at high concentration are toxic for many living organisms. Some microorganism taking the heavy metals from the environment are capable of concentrating and accumulating large quantities of them in different cytoplasmatic structures with no-toxic effects. Microalgae have affinity by the polyvalent metals making possible their use as depollutant agent in waters that contains dissolved metallic ions as alternative methods when others methods of recycle are unusable. In this report a chromium removal study from a plating wastewater, using *scenedesmus obliquus* culture was made. The removal efficiency of Cr (VI) was 12 % and Cr (III) was 27 % and for condition of algae's immobilization removal of Cr (III) was 95 %.

Keywords

Plating. Wastewater treatment. Chromium recovery. Microalgae.

(*) Trabajo recibido el día 3 de diciembre de 2001 y aceptado en su forma final el día 7 de febrero de 2002.

(**) Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), Avda. 25 y 158, Playa, A. Postal 6990, Ciudad de La Habana, Cuba.

(***) Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), Avda. 51, 23611, La Lisa, Ciudad de La Habana, Cuba.

(****) Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior "José A. Echeverría" (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

(*****) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), Avda. Gregorio del Amo, 8, 28040 Madrid, España.

1. INTRODUCCIÓN

Como resultado del incremento de la industria, la agricultura y la población, aumenta el volumen de desechos vertidos a los ecosistemas, a los que hay que sumar cantidades cada vez más grandes de productos químicos de múltiples efectos nocivos, tanto para la flora y fauna como para el hombre. Entre estos desechos se encuentran sustancias de difícil biodegradación, tales como residuos de pesticidas, herbicidas y de metales pesados, que confieren diversos niveles de toxicidad a los efluentes^[1].

Los desechos industriales tóxicos son una problemática para los asentamientos humanos debido a la contaminación ambiental. Esta situación se agrava más aún en los países en vías de desarrollo, aunque el resultado del reciclaje de estos desechos es importante en cualquier territorio del planeta.

La industria galvánica produce una serie de efluentes que, por sus características, representan un problema medioambiental. Por otro lado, resulta interesante la recuperación o separación de algunos de sus componentes para, por ejemplo, su reutilización. Uno de los elementos que está presente en este tipo de aguas es el cromo. Los desechos de cromo representan para los cuerpos receptores un serio problema de contaminación ambiental con el perjuicio para los organismos vivos. En el caso específico del cromo, éste es mucho más tóxico en estado de valencia (VI) que en estado de valencia (III). No obstante, para éste último la dosis recomendada no debe sobrepasar 50 a 200 µg/Kg/día en los adultos, donde µg/Kg es una forma de medir la cantidad de contaminantes que se consume en los alimentos.

La Norma cubana de vertido de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado, (especificaciones: Norma cubana XX: 1999), plantea que, para residuos líquidos a verter en alcantarillado, se debe cumplir que el Límite Máximo Permissible Promedio (LMPP) para el Cr_{total} es de 1,5 mg/l y para el Cr (VI) es de 0,5 mg/l. Las normas europeas son aun más estrictas y están en dependencia del núcleo poblacional hacia el que van dirigidas. Por ejemplo, en España, y dependiendo del agua a verter, los límites permitidos de cromo (VI) varían entre 0,2-0,5 mg/l, mientras que en el caso del cromo (III) estos límites están fijados entre 2-4 mg/l^[2].

En las plantas galvánicas donde se realiza la tecnología de cromado, ya sea con fin ornamental o para mejorar la dureza superficial, se utiliza el cromo hexavalente como materia prima. Es, por

ello, evidente que la toxicidad de las aguas de lavado de estas empresas constituye un peligro potencial para el medio ambiente, en caso de no tratarse adecuadamente.

La complejidad en la composición de los efluentes, ha obligado al desarrollo de sistemas novedosos para su tratamiento. Se conoce que, últimamente, se han desarrollado métodos de recuperación del cromo (VI) mediante el uso de sistemas basados en membranas^[3-6], que tienen ventajas muy positivas respecto a los métodos tradicionales. Otra alternativa de interés es el uso de los métodos biológicos en condiciones que no sean propicias para la recuperación de los metales pesados mediante las técnicas tradicionales. El objetivo del presente trabajo es el estudio del comportamiento del cromo en uno de estos medios biológicos

La biorremediación no es más que el empleo de sistemas biológicos (bacteria, algas, hongos, levaduras y plantas superiores) para eliminar los contaminantes del suelo, agua o gases (medio ambiente en general)^[7]. Esta nueva herramienta de la ciencia incluye la fitorremediación y la biosorción. En el primer caso, se utilizan las plantas para la eliminación y/o recuperación de contaminantes^[8-11] y, en el segundo caso, se utilizan microorganismos.

A diferencia de otros^[8-11], esta tecnología es uno de los métodos más baratos entre los muchos que se usan para el tratamiento de desechos peligrosos; puede llevarse a cabo en el sitio de contaminación y causa la mínima alteración física alrededor del área tratada.

Otras ventajas que presenta este importante potencial biotecnológico, con respecto a las tecnologías tradicionales utilizadas para la descontaminación ambiental, son^[9]:

- La biorremediación refuerza los procesos biogeoquímicos.
- Los compuestos químicos tóxicos son destruidos o eliminados del ambiente y no simplemente separados.
- Requiere menos energía en comparación con otras tecnologías.
- Menos supervisión manual.

La bioacumulación de metales por las microalgas, puede representar un método factible para el tratamiento de aguas residuales que contengan iones metálicos en solución.

Las microalgas ofrecen la ventaja de que pueden ser cultivadas en lagunas, con pequeños

requerimientos de nutrientes para su mantenimiento y desarrollo. Las lagunas con microalgas constituyen la etapa final del proceso de depuración en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales^[10-14].

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, en este trabajo se realiza el estudio de eliminación de Cr(III) y Cr(VI) presentes en las aguas residuales de un taller galvanico, para lo que se utiliza una especie de microalgas de agua fresca, la microalga verde *scenedesmus obliquus*.

Se escogió esta especie de microalga ya que se tiene antecedentes sobre su subsistencia a pH comprendido entre 4 y 9,5^[15], valores a los que se encuentran las aguas residuales de los talleres galvanicos, antes y después del proceso de reducción de Cr(VI) a Cr(III).

Igualmente, existen otros datos sobre la presencia frecuente de esta especie de microalga en aguas naturales^[1], además de estudios anteriores de eliminación de Cr(III) en aguas residuales de tenería, en los cuales se obtiene hasta un 39 % de eficiencia de eliminación del ión Cr(III) en esos efluentes, utilizando una microalga como material biosortivo^[14].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Microorganismo

La cepa utilizada en las experiencias, fue la microalga verde *scenedesmus obliquus*, procedente de la colección de microalgas del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), en Cuba. Para el crecimiento y mantenimiento de la misma se utilizó el medio AES^[16], el cual garantiza óptimas condiciones fisiológicas. A esta cepa se le realizan pases a tubos con medio fresco y estéril cada 15 d. En el cepario, se mantienen con un régimen alternativo de luz y oscuridad de 12 x 12 h, con una intensidad de luz de 2000 Lux y una temperatura de 20 °C.

El medio de cultivo Agar Extracto de Suelo AES (*soil extract*), es una solución Bristol que consta de seis soluciones de 400 ml, con cada una de las siguientes sales, g:

NaNO ₃	10,0
CaCl ₂	1,0
K ₂ HPO ₄	3,0
KH ₂ PO ₄	7,0
NaCl	1,0
MgSO ₄ .7H ₂ O	3,0

2.1.1. Modo de preparación del AES

A 10 ml de cada solución se le agregan 940 ml de agua destilada. Agregar una gota de solución de FeCl₃ al 1 %.

Se obtienen 960 ml de solución Bristol y 40 ml de sobrenadante de extracto de suelo. Se esteriliza en autoclave a 121 °C y 1 atm durante 20 min. Se ajusta a pH = 7,0. Para el extracto de suelo se pesan 500 g de tierra y se adiciona 1 l de agua destilada. Se esteriliza en autoclave durante 20 min a 1 atm, se deja reposar y el sobrenadante se filtra al vacío. Se guarda en refrigerador con éter de petróleo para su conservación.

2.2. Métodos analíticos

La preparación de las muestras, así como las determinaciones de las concentraciones de cromo total se realizaron por (Espectrometría de Absorción Atómica con llama aire-acetileno), se realizó según métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. En el caso del Cr(VI) se utilizan métodos volumétricos normalizados con sal de Mohr.

La determinación de los sólidos volátiles en suspensión (SSV), se realizó según métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (métodos sólidos y volátiles a 550 °C^[17]).

El pH se determinó, según métodos normalizados antes mencionados^[17].

Mediante el método tricromático, se realizaron determinaciones de clorofila "a", en las muestras líquidas y sólidas según^[17], así como observaciones al microscopio óptico Olimpos BH-2 de los cultivos y sólidos.

Las preparaciones fueron realizadas mediante la adición de una alícuota de 0,10 ml del cultivo a observar sobre un portaobjeto cubierto, posteriormente, con un cubre objeto. Dicha observación se realizó con objetivos (40 x) y juego de oculares (10 x/20 L). El procedimiento de preparación antes descrito se realizó por los métodos normalizados para aguas potables y residuales^[17].

2.3. Agua residual

El agua residual utilizada en las experiencias, provino de los fluentes de un taller de galvanotecnia. La composición de esta agua se incluye en la tabla I. En la misma se muestran los valores medios de los resultados, realizados por triplicado, con un 2 % de error, como máximo. A este residual se le añadió medio cultivo albañal sintético para

Tabla I. Composición del residual, en mg/l

Table I. Composition of the waste, in mg/l

Cr ^(VI)	Cr ^(III)	Mg ^(II)	Cu ^(II)	Fe ^(II)	Ni ^(II)	Co ^(II)	Mn ^(II)	Cd ^(II)	Pb ^(II)	Zn ^(II)
343	20	8,33	4,69	0,35	0,94	< 0,05	0,845	21,40	< 0,10	10,0

algas, con el objetivo de proporcionar una fuente nutricional que permitiera el crecimiento y desarrollo de las microalgas. Posteriormente, este residual se inoculó con un 2 % de agua albañal proveniente del Hotel "Bello Caribe", en la Ciudad de La Habana, a fin de proporcionarle el contenido de microorganismos similar al del albañal real.

El medio de cultivo albañal sintético para algas consta de los siguientes componentes, en ml/6l:

Peptona	33,0
NaHCO ₃	30,0
Solución traza	6,0
H ₂ SO ₄ conc.	0,3

A este medio de cultivo se le ajusta el pH a 6,4. La solución traza se prepara disolviendo en 1 l de agua destilada las siguientes cantidades de reactivos, g:

MgSO ₄ ·7H ₂ O	22,83
MgSO ₄ ·4H ₂ O	2,97
FeSO ₄ ·2H ₂ O	0,68
KCl	3,15
(NH ₄) ₂ SO ₄	63,6
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	57,64
CaCl ₂ ·2H ₂ O	2,24

Las soluciones de NaHCO₂ y peptona se preparan, por separado, pesando 50 y 53 g en 1 l de agua destilada, respectivamente.

3. MONTAJE DE LOS EXPERIMENTOS

3.1. Experimento A

Para determinar la posibilidad de eliminar el Cr(VI) presente en las aguas residuales galvánicas, se tomaron 50 l de las aguas residuales crómicas, con una concentración inicial de Cr(VI) de 343 mg/l (Tabla I). Se estudiaron concentraciones diferentes del Cr(VI) en el agua residual: sin dilución, dilución 1:1, dilución 1:4 y dilución 1:8. Este paso de probar diferentes diluciones se realizó, ya que en la bibliografía aparecen datos de estudios realizados con concentraciones de ion Cr³⁺ inferiores a 100 mg/l y otros a concentraciones de 400 mg/l [18], es decir, en dos intervalos diferentes de concentración inicial del metal en solución. Teniendo en cuenta esto, se realizó el estudio del comportamiento de las microalgas frente al metal a diferentes concentraciones y abarcando aproximadamente los intervalos estudiados por otros autores.

El experimento se realizó en cuatro probetas de 0,5 l, añadiéndoseles: agua residual galvánica, agua albañal sintético, agua residual albañal real y concentrado de biomasa (microalgas), en las proporciones que se muestran en la tabla II. Las microalgas se encontraban en estado libre. El experimento antes descrito se desarrolló, primero, con las aguas residuales conteniendo Cr(VI). La concentración de este ión se describe en las tablas II y III.

Tabla II. Volúmenes de solución añadidos a cada probeta, % del volumen total

Table II. Volumes of solution added to each probe, in % of total volume

Dilución	Concentración inicial de Cromo, mg/l		Volumen de agua residual galvánica	Volumen de agua albañal sintético	Volumen de agua residual albañal real	Volumen de biomasa (microalgas)
	Cr(VI)	Cr(III)	(%)	(%)	(%)	(%)
1:0	343	235	96,4	0	2	1,6
1:1	173	160	48,2	48,2	2	1,6
1:4	87	82	24	72,4	2	1,6
1:8	43	40	12	84,4	2	1,6

Tabla III. Eliminación del Cr(VI) en función de la concentración inicial de metal

Table III. Cr(VI) removal against the initial metal concentration

Cr (VI) inicial, mg/l	Eliminación, %
343	9,0
173	10,4
87	8,1
43	4,7

Resultados después de 24 h. SSV de biomasa 870 mg/l

Se realizó un segundo trabajo experimental, pero con aguas residuales que contengan cromo en forma de Cr(III); la concentración de este ión se describe en las tablas II y IV. Para acometer este segundo experimento fue necesario realizar, primeramente, un proceso de reducción de los iones Cr(VI) a Cr(III), para lo que se utilizó una solución de sulfito de sodio a una concentración de 1200 mg/l. Este proceso de reducción se hace completo en medio ácido por lo que se añadió 0,10 l de ácido sulfúrico concentrado alcanzando un pH de 2,3. Posteriormente, el pH se aumenta hasta 3 mediante la adición de hidróxido de sodio. Este paso se realizó con el objetivo de observar cual sería el comportamiento de la microalga en cuanto a eficiencia de adsorción de estas dos especies iónicas de cromo.

Se suministró aire mediante burbujeo en cada una de las probetas, para mantener homogeneidad en la solución, y se tomaron muestras a distintos tiempos de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 24 h. Además, se realizaron mediciones de pH y observaciones al microscopio óptico con el fin de darle seguimiento al estado fisiológico de la cepa

Tabla IV. Eliminación del Cr(III) en función de la concentración inicial de metal

Table IV. Cr(III) removal against the initial metal concentration

Cr (III) inicial, mg/l	Eliminación, %
235	11,9
160	23,6
82	26,8
40	7,5

Resultados después de 24 h. SSV de biomasa 725 mg/l

de microalga. A cada uno de los experimentos descritos anteriormente se le realizaron tres réplicas.

3.2. Experimento B

En esta ocasión, se decidió realizar un experimento utilizando la microalga en estado inmovilizado y comenzar con una concentración inicial de Cr(III) entre 70 y 80 mg/l, por ser el intervalo de concentración con el que se obtuvo mayor eficiencia de eliminación de Cr(III), utilizando la microalga en estado libre.

Para lograr esta concentración se tomó agua residual galvánica con una concentración inicial de Cr(VI), de 343 mg/l (tabla I), y se realizó una dilución 1:4, obteniendo un volumen de 150 l. El cromo en solución, que se encontraba como Cr(VI), fue reducido a Cr(III) con 180 g de metabisulfito industrial. Este proceso de reducción se hace completo en medio ácido, por lo que se añadió 10 ml de ácido clorhídrico concentrado, alcanzando un pH de 2,3. En este medio tan ácido la microalga no sobrevive, por lo tanto se ajustó el pH a 3 con una solución de hidróxido de sodio.

Utilizando una bomba centrífuga se trasvasó el agua residual a una cubeta de 150 l de capacidad, donde se encontraba la microalga inmovilizada sobre una plancha de espuma de poliuretano (densidad 20), con dimensiones de 0,30 × 0,90 m de superficie y espesor de 0,02 m.

Se concibió el experimento con una duración de 2 d con tomas de muestras en los tiempos 0, 4, 8, 16, 24, 28, 32, 40 y 48 h. A este experimento se le realizaron tres réplicas.

3.2.1. Inmovilización de la microalga

Para la inmovilización se tomó un inóculo de la microalga *Scenedesmus obliquus*, el cual presentaba un volumen de 2 l y densidad óptica 1. Este inóculo se añadió a una cubeta que contenía 20 l de medio de cultivo albañal sintético para algas, dentro de la cual se encontraba sumergido el medio soporte (espuma de poliuretano) escogido para la inmovilización.

El medio soporte estuvo en contacto con la microalga durante 21 d. Al término de este período de tiempo, había sido ya colonizada la matriz de inmovilización por la microalga y la densidad óptica del medio de cultivo era, solo, un 10 % de la obtenida al inicio del proceso que era de 1. Es decir, que el 90 % de la biomasa presente (suspensión) al inicio del proceso de inmovilización ya

había pasado al medio soporte, por tanto se dio por culminada la etapa de inmovilización.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comportamiento de la microalga *scenedesmus obliquus* frente al Cr(VI) y Cr(III)

En el experimento desarrollado con aguas residuales conteniendo Cr(VI), se realizó el estudio del comportamiento del cultivo de microalgas mediante la determinación de clorofila "a", como una medida del crecimiento y desarrollo del cultivo. En este estudio se pudo observar que las células de *scenedesmus obliquus* sufrieron un deterioro a partir de las 8 h de tiempo de experimentación, lo que se puso de manifiesto por la pérdida de color de las mismas, dando como resultado una disminución en los valores de clorofila "a" (Fig.1).

En el caso del experimento realizado con aguas residuales conteniendo Cr(III), las células de la microalga tuvieron un comportamiento muy similar al caso anterior (Fig. 2), aunque se observó que, en el caso del Cr(VI), las células de *scenedesmus obliquus* fueron más afectadas (resultó más tóxico) que cuando se trabajó con Cr(III). Este comportamiento se puede apreciar por la diferencia en las pendientes de las líneas que unen los puntos de tiempo de experimentación 8 y 16 h en las figuras 1 y 2. En la figura 1, las líneas que unen estos dos puntos presentan un valor de pendiente promedio de 0,99, mientras que en la figura 2 el valor de la pendiente promedio de las rectas que unen esos dos mismos puntos es de 0,53.

El comportamiento manifestado por la microalga *scenedesmus obliquus* en ambas experiencias, se

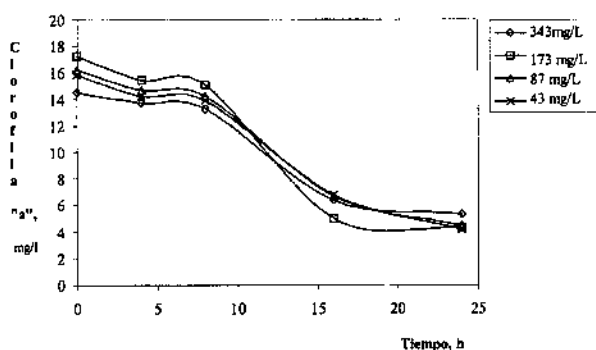


Figura 1. Comportamiento de la microalga *scenedesmus obliquus* en el tiempo, frente a la toxicidad del Cr(VI), a diferentes concentraciones de metal.

Figure 1. Behaviour of the microalgae scenedesmus obliquus vs. time, and against the toxicity of Cr(VI) at different concentrations of the metal.

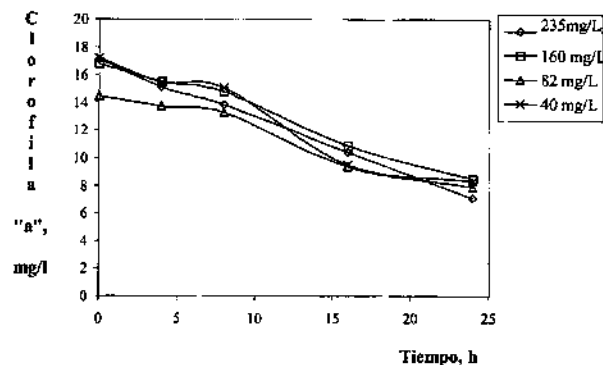


Figura 2. Comportamiento de la microalga *scenedesmus obliquus* en el tiempo, frente a la toxicidad del Cr(III), a diferentes concentraciones de metal.

Figure 2. Behaviour of the microalgae scenedesmus obliquus in the experimentation time, and against of the toxicity of Cr(III) ion at different concentrations of metal.

debió, fundamentalmente, a las condiciones adversas del medio (pH y toxicidad del metal), lo cual se reflejó en los cambios morfológicos experimentados por la microalga. Algunos de los cambios fueron: rotura de las estructuras internas, adelgazamiento de la célula, pérdida de color, así como aumento del pirenóide.

En la tabla III se muestran los resultados de eliminación de Cr(VI) presente en aguas residuales galvánicas, utilizando la microalga *scenedesmus obliquus* en estado libre. En esta tabla se puede apreciar que, como máximo, se logró obtener una eficiencia de eliminación de Cr(VI) del 10,4 %, a la concentración inicial de cromo de 173 mg/l.

En la tabla IV, se muestran los resultados de eliminación de Cr(III) presente en aguas residuales galvánicas, utilizando la microalga *scenedesmus obliquus* en estado libre. En esta tabla se puede apreciar que, como máximo, se logró obtener una eficiencia de eliminación del Cr(III) del 26,8 %, a la concentración inicial de cromo de 82 mg/l.

Se puede apreciar en ambos casos (Figs. 1 y 2), que la mayor parte del proceso de adsorción del metal por la microalga (70,0-100 %), ocurrió durante las primeras 8 h de contacto entre la microalga y la solución que contenía los metales. Este comportamiento concuerda con lo expresado por la literatura, donde se plantea que existe una primera fase (rápida) de adsorción del metal sobre la superficie de la microalga, que puede ser reversible, y una segunda fase (lenta) de absorción del metal por la microalga. Esta última fase no es reversible y puede traer como consecuencia la intoxicación y muerte de la biomasa si las concentraciones de metal en la solución son elevadas.

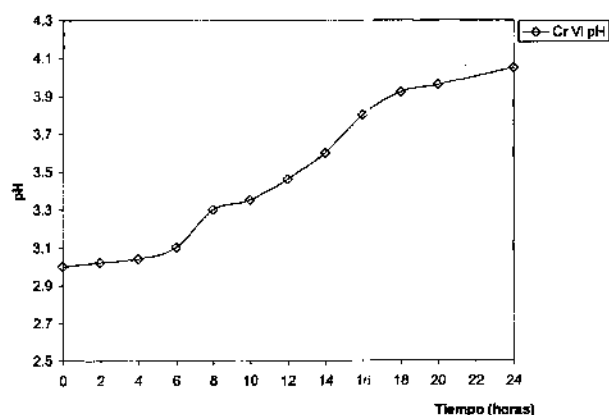


Figura 3. Comportamiento promedio del pH con respecto al tiempo, en el experimento realizado con Cr(VI).

Figure 3. Average behaviour of the pH vs. time of Cr(VI) performed experiment.

Este proceso se puede apreciar por el comportamiento seguido por la microalga que, a partir de las 8 h de experimentación, manifestó un cambio de color, lo cual provocó la disminución en los valores de clorofila, como se puede observar en las figuras 4 y 5.

Además, este comportamiento indica que a partir de ese tiempo, los metales adsorbidos sobre la superficie de la microalga comenzaron a pasar al interior de la célula provocando trastornos en el metabolismo de las mismas, manifestando pérdida de color, adelgazamiento de las células, ruptura de las estructuras internas y finalmente el estallido de estas. Por este motivo no se aprecian valores importantes de eliminación de los metales en solución, a partir de las 8 h de experimentación.

Haciendo un análisis de estas experiencias, se podría plantear que la eficiencia de eliminación

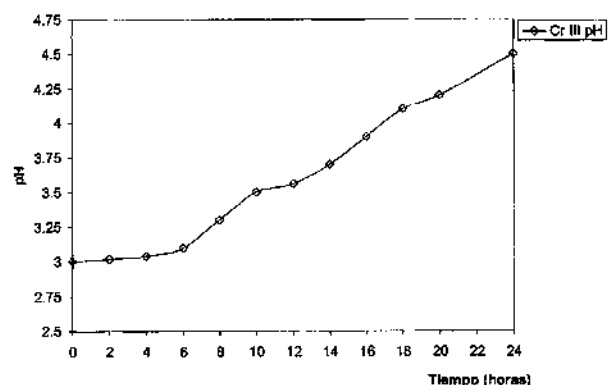


Figura 4. Comportamiento promedio del pH con respecto al tiempo, en el experimento realizado con Cr(III).

Figure 4. Average behaviour of the pH vs. time, at of Cr(VI) performed experiment.

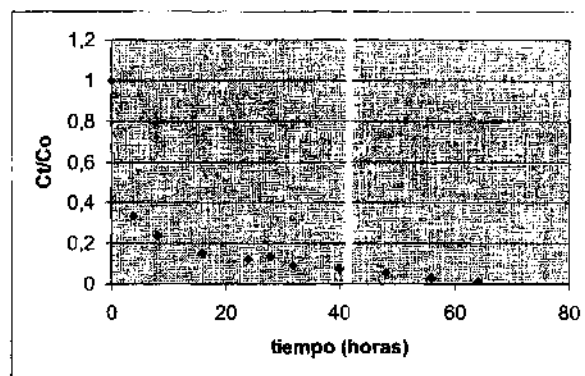


Figura 5. Concentración adimensional de Cr(III) frente al tiempo en condiciones de inmovilización del alga. Concentración inicial de Cr(III) de 85,6 mg/l a pH 4,5, biomasa algal soportada 200g/m², área superficial del soporte 8,4 m² y volumen de trabajo 150 l.

Figure 5. Dimensionless concentration of Cr(III) against time in the condition of algae immobilization. Initial concentration of Cr(III) of 8,6 mg/l at pH 4,5, supported algae's biomass 200g/m², support's area 8.4 m² and volume 150 l.

del cromo por la microalga *Scenedesmus obliquus*, para las condiciones experimentales de este trabajo, aumenta en dependencia de la concentración inicial del metal en la solución, así como por la carga iónica que el mismo presente. La microalga presentó mejor comportamiento en cuanto a captura del metal, cuando el ion metálico, en este caso el cromo, se encuentra como Cr(III) y no cuando se encuentra como Cr(VI) (Tabla V).

El pH afecta la solubilidad de los metales, la actividad de los grupos funcionales en la biomasa, así como la competencia de los iones metálicos por los sitios o lugares de enlace de la biomasa. A pH entre 4 y 5, muchos metales en solución se encuentran ionizados como especies catiónicas.

En las figuras 3 y 4 se puede observar el comportamiento ascendente del pH durante todo el tiempo de experimentación. En ambos casos, se comenzó con valores de pH de 3 y se finalizó con valores próximos a las 4,50 unidades.

A estos valores de pH, los grupos carboxilos de la biomasa estarían extremadamente disociados, generando superficies cargadas negativamente^[19], así como los grupos aminos de la pared celular de la microalga, los cuales juegan un papel importante en la acumulación de metales por la biomasa.

Este proceso explica por qué se obtuvo como resultado una mayor eficiencia de eliminación del Cr(III), presente como Cr³⁺, que en el caso del Cr(VI) presente como los aniones Cr₂O₇²⁻ y/o HCrO₄.

Tabla V. Análisis estadístico comparativo entre los resultados de eliminación del Cr(VI) y el Cr(III) por las microalgas *scenedesmus obliquus*

Table V. Comparative statistical analysis in the removal of Cr (VI) and Cr (III) by the microalgae *scenedesmus obliquus*

Tratamientos comparados	Valor de probabilidad obtenido
235 mg/l Cr(VI) y 343 mg/l Cr(III)	$5,05 \times 10^{-6}$
160 mg/l Cr(VI) y 173 mg/l Cr(III)	$1,03 \times 10^{-3}$
82 mg/l Cr(VI) y 87 mg/l Cr(III)	$4,0 \times 10^{-3}$
40 mg/l Cr(VI) y 43 mg/l Cr(III)	$3,0 \times 10^{-3}$

En el trabajo realizado con agua residual de un taller galvánico, el resultado máximo obtenido en eficiencia de eliminación de cromo está próximo al 30 %, resultado similar a los encontrados en la literatura^[18].

Se han llevado a cabo experiencias preliminares para estudiar la viabilidad de la eliminación del Cr(III) del agua residual, usando como técnica de separación la retención en la microalga y estando inmovilizadas en poliuretano. Las condiciones de trabajo se muestran en la figura 5, mostrando ésta la evolución de la concentración adimensional del Cr(III) en la disolución frente al tiempo. Se puede observar que la concentración del Cr(III) en la disolución se ve enormemente reducida (por ejemplo, hasta 95 % en 30 h y hasta 99,8 % en 64 h), confirmándose la viabilidad de esta tecnología cuando se aplica a la eliminación de Cr(III) de este tipo de residuales.

5. CONCLUSIONES

- La eficiencia máxima de eliminación del ion cromo presente en las aguas residuales galvánicas utilizando la microalga *scenedesmus obliquus* en estado libre, para las condiciones de experimentación de este trabajo alcanzó un valor próximo al 30 %.
- Se pudo apreciar, mediante análisis de clorofila "a" y observaciones al microscopio, que las concentraciones de cromo utilizadas en estas experiencias fueron tóxicas para la microalga *scenedesmus obliquus* en estado libre, afectando a la morfología de la misma.
- En condiciones de inmovilización se logran mejores resultados, por ejemplo 95, % de eliminación de Cr(III) en 30 h y 99,8 % en 64 h.

REFERENCIAS

- [1] L. TRAVIESO, R.O. CAÑIZARES, F. BENÍTEZ, A.R. DOMÍNGUEZ, J.L. CONDE, R. DUPEYRON y V. VALIENTE, *Revista CNIC* 26, N° Especial XII Seminario Científico CNIC, La Habana, 28 - 30 Julio 1995.
- [2] Real Decreto 849/1986, Boletín Oficial del Estado N° 103 de 30 de abril de 1986, p. 15.500.
- [3] A.I. ALONSO y C.C. PENTELEDIS, *J. Membr. Sci.* 110 (1996) 151-167.
- [4] A.M. SASTRE, A. KUMAR, J.P. SHUKLA y R.K. SINGH, *Sep. Purif. Methods* 27 (1998) 213-298.
- [5] R. MOLINARI, M.G. BUONOMENA y E. DRIOLI, *Proc of the XXI International Processing Congress*, Vol. A, P. Massacci (Ed.), Elsevier Amsterdam, 2000, A6:95-A6:102.
- [6] F.J. ALGUACIL, A.G. COEDO y M.T. DORADO, *Hydrometallurgy* 57 (2000) 51-56.
- [7] A. SÁNCHEZ, A. BALLESTER, M.L. BLÁZQUEZ, F. GONZÁLEZ, J. MUÑOZ y A. HAMMAINI, *Fems Microbiol. Reviews* 23 (1999) 527-536.
- [8] D.R. LOVEY and J.D. COATES, *Environ. Biotechnol.* 8 (1997) 285-289.
- [9] F.J. ALGUACIL e Y. MERINO, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 428-436.
- [10] B. VOLESKY, "Biosorption", 1999. www.Volesky.edu.ca
- [11] B. VOLESKY y J. PHILLIPS, *Environmental Technology* 10 (1995) 225-233.
- [12] D.W. DARNALL, B. GREENE, M.T. HENZL, J.M. HOSEA, R.A. MC.PHERSON, J. SNEDDON y M.D. ALEXANDER, *Environ. Sci. Technol.* 20 (1986) 206-208.
- [13] T.A. JACKSON, *Environ. Geol.* 2 (1978) 173-189.
- [14] A. NAKAJIMA, T. HORIKOSHI y T. SAKAGUCHI, *J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 12 (1981) 76-83.
- [15] M.A. BOROWITZKA, *Microalgae Biotechnology*, University Press, Cambridge, 1988.
- [16] *Catálogo de Cultivos Microbianos*, 1ª Edición, Dpto. de Bioingeniería y Biotecnología, CINVESTAV. IPN, México, 1982.
- [17] *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, APHA, AWWA, WPCF, 1992.
- [18] D. BRADY, I. LETEBEJE, J.R. DUNCAN y P.D. ROSE, *Water SA.* 20 (1994) 213-218.
- [19] N. KUYUCAK y B. VOLESKY, *CIM Bulletin* 81 (1988) 95-99.