

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MICROALGA *Scenedesmus obliquus* PARA LA PRECIPITACIÓN DE CROMO EN ALBAÑAL SINTÉTICO

Oiris Veranes-Deliz, Alexis Pellón-Arrechea, Maria del C. Espinosa-Llorens,
Antonio Oña-Machín, Elsa Pérez-Despaigne



oiris.veranes@cnic.edu.cu, alexis.pellon@cnic.edu.cu

Departamento de Estudio sobre Contaminación Ambiental (DECA), Centro Nacional de
Investigaciones Científicas (CNIC), Cuba

● Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de la microalga *Scenedesmus obliquus* en la precipitación de cromo (Cr) de aguas residuales crómicas sintéticas. La microalga procedió de la colección del Centro Nacional de Investigaciones Científicas, se inmovilizó en espuma de poliuretano en un reactor de 150 L de capacidad y se trabajó con concentraciones iniciales del metal de 20, 60 y 100 mg/L. La precipitación fue el proceso que se vio más favorecido en la remoción del metal. Se lograron eficacias mayores del 95 % en la remoción del cromo, lo que se traduce en concentraciones del metal inferiores a la máxima permisible normada en aguas, según la Norma Cubana NC 27:1999, para la concentración de 20 mg/L. Estos resultados sugieren la capacidad de *Scenedesmus obliquus* para la remoción de cromo, mediante precipitación, en efluentes galvánicos en las condiciones estudiadas.

Palabras clave: microalgas, *Scenedesmus obliquus*, cromo, remoción, tratamiento aguas residuales.

● Abstract

The objective of this work was to evaluate the application of the microalga *Scenedesmus obliquus* in the precipitation of Cr in synthetic chromic wastewaters. The microalga came from the collection of the National Center for Scientific Research. It was immobilized in polyurethane foam in a reactor of 150 L of capacity and working with initial metal concentrations of 20, 60 and 100 mg/L. The precipitation was the process that was favored in the metal removal. An effectiveness bigger than 95 % was achieved in chromium removal, that meant metal concentrations lower than the maximum permissible discharge standards in waters, according to the Cuban Standard NC 27:1999, for the concentration of 20 mg/L. These results suggest the capacity of *Scenedesmus obliquus* of removing chromium through precipitation in galvanic effluents, under the studied conditions.

Key words: microalgae, *Scenedesmus obliquus*, chromium, recovery, wastewater treatment.

● Introducción

Es bien conocido que, entre los residuos tóxicos producidos como resultado de la actividad industrial, los metales pesados se han convertido en uno de los principales contaminantes ambientales, debido a que sus concentraciones han ido en aumento /1/. Lo que ha provocado incremento en los efectos adversos causados

por la persistencia y el fenómeno de biomagnificación /2/. Esta problemática ha generado preocupación en las autoridades sanitarias a nivel mundial.

Una de las fuentes de ingreso de estos metales al ambiente lo constituyen las descargas poco tratadas o sin tratar de los efluentes de la industria galvánica.

Debido a los altos costos de operación y mantenimiento de los métodos físico-químicos convencionales y avanzados para la remoción de metales pesados y a la ineficiencia de su empleo para bajas concentraciones /3/, en nuestro país se vierten directamente a los cuerpos receptores o a través del alcantarillado en las zonas urbanas, sin tratamiento alguno, aproximadamente 480 m³/día de aguas residuales generadas por los talleres galvánicos cubanos. Esto provoca serios problemas de contaminación del medio ambiente, con el perjuicio de los organismos vivos /4-6/.

Teniendo en cuenta estos antecedentes se propuso un estudio para la remoción mediante precipitación del cromo presente en aguas residuales sintéticas con el empleo de un reactor biológico usando un cultivo inmovilizado de la microalga *Scenedesmus obliquus*, la cual ha sido empleada en los sistemas de tratamiento (lagunas de estabilización) de aguas residuales /7/.

De acuerdo con esto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la aplicación de la microalga *Scenedesmus obliquus* en la precipitación de Cr de aguas residuales crómicas sintéticas hasta valores inferiores a lo establecido en las normas cubanas NC 24: 1999 y 27: 1999 /8, 9/.

● Materiales y métodos

Microorganismo

La cepa utilizada fue la microalga *Scenedesmus obliquus* (Turp.) Kutz: Hindak 79/585, proveniente de la colección de microalgas del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), en Cuba.

Para el crecimiento y mantenimiento de esta cepa se utilizó el medio de cultivo Agar Extracto de Suelo (AES) /10/, el cual garantiza óptimas condiciones fisiológicas. Se mantuvieron con un régimen alternativo de luz y oscuridad de 12 · 12 h, con una intensidad de luz de 2000 Lx y una temperatura de 20 ± 2 °C. El cultivo fue inmovilizado en espuma de poliuretano, elaborado en Cuba, con 45 kg/m³ de densidad y comercializado por la empresa Dojo Copo S.A.

Reactor

Se empleó un reactor biológico cilíndrico rotatorio con microalgas inmovilizadas que operó en discontinuo.

Agua residual crómica sintética

Se disolvieron 3 g de dicromato de potasio en 150 litros de agua destilada. El Cr (VI) en disolución, fue reducido a Cr (III) (20, 60 y 100 mg/L) con 260, 610 y 1010 mg de sulfito de sodio, respectivamente. Este proceso de reducción se realizó en medio ácido, añadiendo ácido sulfúrico al 10 %, alcanzando un pH de 2,30 ± 0,20 unidades.

Se ajustó el pH a 4 con una disolución de hidróxido de sodio al 20 %. Posteriormente, a esta disolución se le añadieron los reactivos del medio de cultivo albañal sintético /10/ para microalgas, con el objetivo de simular las características del agua residual galvánica, fundamentalmente en cuanto a composición de HCO₃⁻, N y P (nutrientes esenciales para el desarrollo de las microalgas).

Métodos analíticos

Los análisis de las muestras fueron realizados según los métodos normalizados para el análisis de aguas y aguas residuales /11/. Para la determinación de Cr_{total} se empleó espectrometría de absorción atómica y el método de difenil carbacida para Cr (VI).

Métodos estadísticos

Todos los resultados analíticos fueron procesados estadísticamente, calculando la media (X) y la desviación estándar (DE). Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y (para el 95 % de confianza). La comparación estadística se realizó con los programas de computación Microsoft Office Excel 2010 y Statgraphics Plus 5.1 2001.

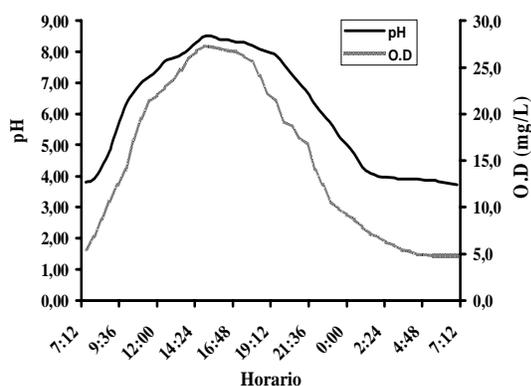
Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

● Resultados y discusión

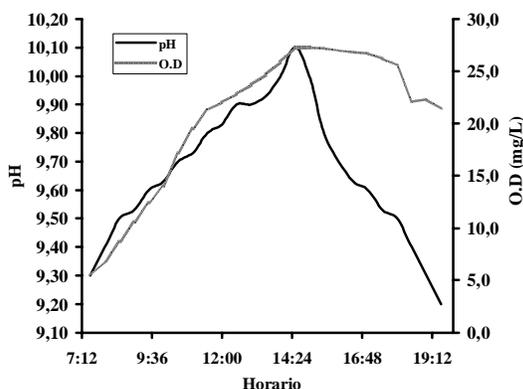
Análisis del comportamiento del pH y el oxígeno disuelto (OD) en el reactor, sin la presencia de cromo en disolución.

Con el objetivo de emplear *Scenedesmus obliquus* para la precipitación del cromo en disolución, previamente se decidió determinar, de forma experimental, cómo variaba el pH y el OD por la presencia de la microalga, empleando agua residual sintética, en ausencia de cromo.

Los resultados de la medición de estas variables se muestran en las figuras 1a y b.



a



b

Fig. 1 Resultados de la medición de pH y OD en el efluente del reactor, para tiempos de retención hidráulica (t_0) de 24 (a) y 12 (b) h.

En la figura 1a, se aprecia la variación de pH y OD para t_0 de 24 h. La misma muestra cómo el sistema presenta tres comportamientos diferentes: dos ocurren durante las horas de iluminación solar, en las que los valores de pH y OD en el efluente del reactor ascienden de manera progresiva durante el horario de 7:30 a 15:30.

Posteriormente comienza un descenso lento de ambos indicadores hasta las 19:00 h en el caso del OD y las 19:30 horas para el pH. El tercer momento ocurre a partir de estas últimas horas y durante toda la noche, donde las curvas presentan pendientes más pronunciadas, indicando que el descenso en los valores es mayor hasta terminar igualándose en ambos parámetros los valores del agua afluyente (pH = $3,81 \pm 0,06$ y OD = $5,25 \pm 0,45$ mg/L) con los del efluente.

El objetivo que se busca es la remoción de cromo presente en los efluentes de los talleres galvánicos (agua residual crómica sintética), mediante la separación del mismo del medio líquido por la formación de un lodo, debido a la precipitación de éste como hidróxido, teniendo en cuenta la poca solubilidad de esa sustancia en agua.

Para lograr esto es necesario alcanzar valores de pH en el medio superiores a 8,0 unidades. Esto sólo es posible cuando se opera el reactor con t_0 de 12 h (7:30 a 19:30 horario de iluminación solar que permite a la microalga realizar la fotosíntesis y, por consiguiente, la elevación de pH en el medio), después de haber alcanzado el estado estacionario (figura 1b).

Teniendo en cuenta lo planteado en el párrafo anterior se decidió realizar los experimentos de remoción de cromo presente en las aguas residuales galvánicas, operando el reactor con t_0 de 12 h.

Para esto, se estudió la influencia que ejercía sobre el pH el consumo de carbono por la microalga utilizada.

Consumo de carbono inorgánico por el cultivo y su influencia sobre el pH

S. obliquus es una microalga autótrofa y, por lo tanto, utiliza como fuente de energía el carbono inorgánico que está presente en el medio acuático en que se encuentre. En este caso, por la composición del medio de cultivo utilizado en las experiencias (albahal sintético para algas) y el pH inicial del agua residual crómica sintética la forma mayoritaria de carbono inorgánico presente en disolución es el CO_2 como ácido carbónico (H_2CO_3), de acuerdo con el equilibrio clásico de los carbonatos /12, 13/ constituyendo éste la fuente de carbono que consumen preferentemente tanto *S. obliquus* como la mayoría de las algas verdes

/14, 15/, siendo asimilable de manera directa por éstas.

El equilibrio de concentraciones entre CO_2 y HCO_3^- se alcanza a pH 6,4. Esta última especie de carbono se encuentra en mayor proporción alrededor de pH 8,3 y es consumida de manera eficiente por las algas verdes, debido a que es transportada al interior de la célula a través de la pared celular. Una vez allí, es convertida en CO_2 y OH^- /14, 15/.

El comportamiento descrito anteriormente provoca que el pH manifieste un ascenso continuo. A valores de pH entre 8,5 y 9 aparece en disolución el CO_3^{2-} . El valor máximo de pH medido en los experimentos fue

10,1, que se alcanza cuando se llega a la igualdad de concentraciones entre HCO_3^- y CO_3^{2-} .

En la figura 2, se muestra la variación de la concentración de CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} durante el tiempo de operación del reactor, en el cual interviene el equilibrio clásico de los carbonatos en las aguas naturales, al que se adicionan los cambios provocados por el metabolismo de la microalga presente /7/. Como resultado del metabolismo del cultivo y, fundamentalmente, de *S. obliquus* se reportan consumos de carbono inorgánico entre el 50 y 72 %, al comparar las concentraciones encontradas en el efluente con respecto a las inicialmente presentes en el afluente ($\text{CO}_2 = 275 \pm 5,10 \text{ mg/L}$).

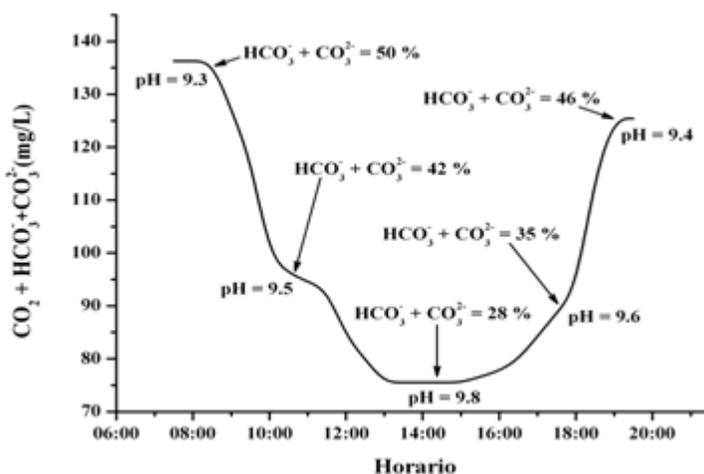


Fig. 2 Resultados de la determinación de HCO_3^- y CO_3^{2-} en el efluente del reactor para tiempos de retención hidráulico de 12 h.

Un análisis de la figura 2, revela que, en la medida que aumenta el consumo de carbono por el cultivo, también se incrementan los valores de pH medidos en el medio corroborando la presencia del equilibrio de los carbonatos y teniendo en cuenta que, según Macías y Fagundo y col. /12 y 13/, éste es el responsable del comportamiento del pH en el agua de manera natural.

Aunque se ha observado que el mayor crecimiento del cultivo de *S. obliquus* y de la mayoría de las algas verdes se alcanza a valores de pH entre 6,5 y 7 unidades /14, 15/, las algas verdes, incluyendo a *S. obliquus*, son capaces de incrementar de manera natural este indicador hasta valores ascendentes a 9 y 10 unidades, y continuar desarrollándose y creciendo

de manera estable, condición ésta observada en el presente trabajo.

Análisis del comportamiento de las variables: temperatura, iluminación solar, pH, oxígeno disuelto, concentración de Cr en el efluente y eficiencia de remoción del metal, durante el tratamiento de agua residual sintética

Para facilitar la interpretación del proceso de remoción de Cr mediante el método propuesto es necesario saber cómo se comporta el pH y el oxígeno disuelto en presencia de soluciones de Cr, teniendo en cuenta la influencia que ejercen la temperatura y la iluminación solar, sobre el comportamiento del cultivo

y éste, a su vez, sobre el proceso de remoción de Cr. Estos experimentos se llevaron a cabo con una solución sintética con concentraciones de 20, 60 y 100 mg Cr/L.

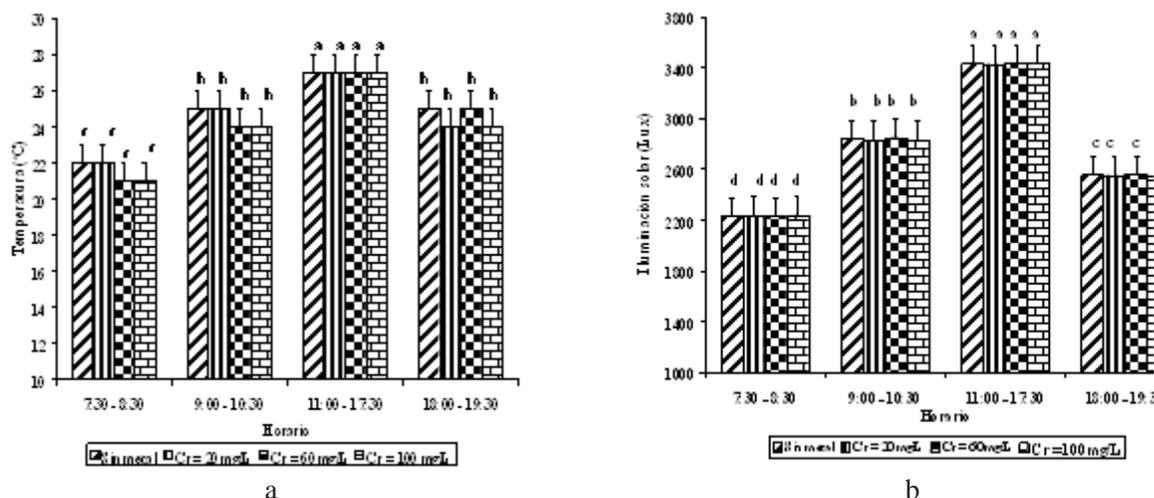
En la figura 3 se muestran los resultados de la variación de la temperatura y la iluminación solar durante el día. Para su mejor interpretación se han dividido estos, en cuatro intervalos de horario.

En dicha figura se aprecia que existen diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de la temperatura y la iluminación solar, durante el transcurso del día (comparación entre los cuatro grupos horarios), teniendo en cuenta los horarios en que han sido separadas.

Este comportamiento se mantuvo de igual manera durante toda la fase experimental. Sin

embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas, en su variación con el transcurso de los días (comparación entre los cuatro experimentos para un mismo horario del día), es decir, al comparar entre sí el comportamiento de éstas, los días en que se realizaron experimentos (cuatro experimentos con sus tres réplicas cada uno).

Esto establece que las variaciones o diferencias que puedan ocurrir en el comportamiento de variables como pH y oxígeno disuelto en el efluente del reactor para las tres concentraciones de Cr objeto de estudio, no son debidas a la variación de las condiciones ambientales entre experimentos en esos días, sino a las condiciones de operación en que se llevó a cabo el experimento.



**Fig. 3 Resultados de la medición de temperatura ambiente (a) e iluminación solar (b).
Letras desiguales difieren significativamente para $\alpha = 0,05$.**

En la figura 4 se muestra, a su vez, la variación del pH y el OD.

Se observa que el pH presenta un comportamiento similar al mostrado por la temperatura y la iluminación solar, cuando se realiza el análisis comparativo entre los cuatro horarios del día.

La forma de manifestarse este indicador sugiere que, efectivamente, las condiciones ambientales tienen un efecto importante sobre el cultivo, que se expresa a través de la variación del pH en el transcurso del día.

También se aprecia que no existen diferencias estadísticamente significativas en los resultados mostrados por esta variable, cuando el reactor operó a concentraciones iniciales de cromo total de 20, 60 y 100 mg/L con respecto a la corrida que se realizara sin Cr en disolución, para un mismo horario del día. Además se observa en la misma figura, un incremento estadísticamente significativo en los valores de pH en el efluente del reactor, con respecto a los mostrados por el agua residual afluente al reactor (afluente), para la operación con y sin Cr en disolución.

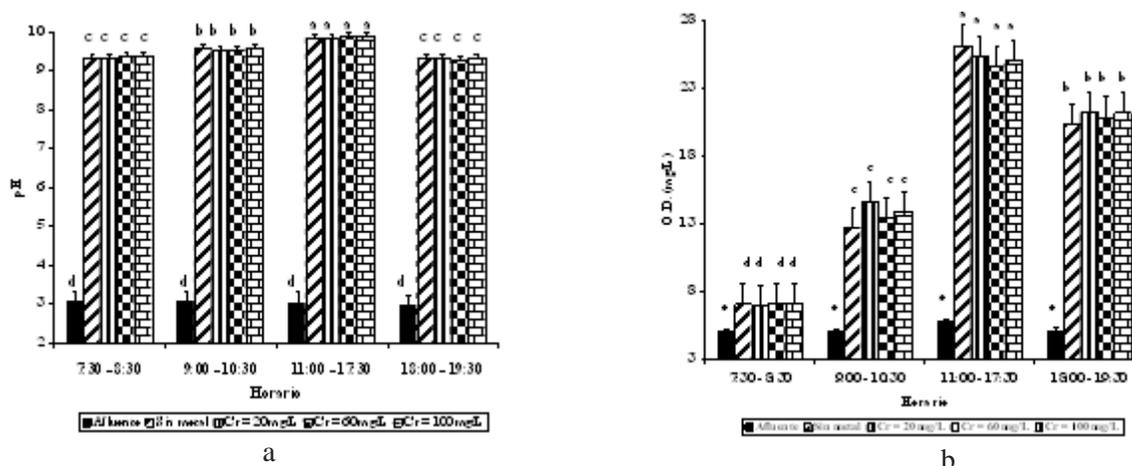


Fig. 4 Resultados de la medición de pH (a) y OD (b). Letras desiguales difieren significativamente para $\alpha = 0,05$.

Comportamiento similar al anterior se observó en los resultados de medición de OD en el efluente, como medida de la realización del proceso de fotosíntesis por el cultivo.

Es de destacar que los valores de OD sobrepasaron los niveles de saturación para la temperatura con que se realizaron los experimentos. Este tipo de comportamiento ha sido observado y

comentado por numerosos investigadores entre los que se encuentran /14, 16, 17/.

Ambos resultados indican que el metabolismo del cultivo y, especialmente, *S. obliquus* no fue afectado por las concentraciones de Cr utilizadas en los experimentos, en comparación con el desenvolvimiento normal del cultivo en estado natural, es decir, sin presencia de Cr en disolución, dentro del reactor.

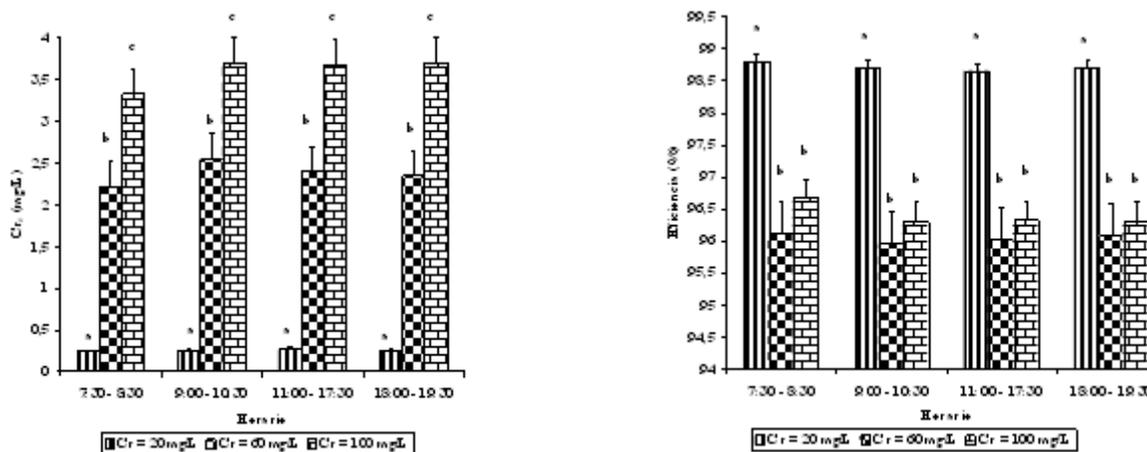


Fig. 5 Resultados de la determinación de la concentración de Cr en el efluente de la tecnología (a) y eficiencia de remoción de Cr (b). Letras desiguales difieren significativamente para $\alpha = 0,05$.

Al observar los resultados de la concentración de Cr en el efluente del reactor (figura 5a) se aprecia que no existen diferencias estadísticamente significativas en los mismos (cuando se realiza la comparación entre los cuatro grupos horarios, para un mismo valor de concentración inicial de Cr en disolución o un

mismo experimento) durante las 12 h de operación del equipo. Este comportamiento indica que las variaciones que muestran los valores de pH, debido a la influencia que ejercen las variables ambientales sobre el cultivo, no tienen efecto significativo sobre el proceso de remoción de Cr que está teniendo lugar en el reactor.

Es decir, que el mismo se comporta de manera estable, al menos en el intervalo de pH en que operó (9,30 a 10,10).

Al realizar la comparación estadística del mismo indicador, pero en este caso entre las concentraciones iniciales de Cr en disolución (comparación entre los tres experimentos para un mismo horario) (figura 5a), se obtiene que existen diferencias estadísticamente significativas, mostrando que la respuesta de salida del proceso de remoción de Cr que tiene lugar en el reactor sí depende de la concentración inicial del metal en el afluente a tratar por este.

Este aspecto es de importancia vital, debido a que para concentraciones iniciales de Cr en disolución en el afluente de hasta 20 mg/L, se pueden obtener en el efluente del reactor concentraciones de este metal inferiores a 2,00 mg/L que es el valor que establecen las normas cubanas para el vertimiento de aguas residuales al medio ambiente y a cuerpos receptores /8, 9/.

Sin embargo, para el caso de 60 y 100 mg/L se necesitaría un post-tratamiento de afino sencillo para poder cumplir con dicho indicador, teniendo en cuenta que las concentraciones de Cr en el efluente del reactor, en ambos casos, están bien próximas a lo estipulado en la norma.

Debe puntualizarse que si los talleres galvánicos operan como está establecido, la concentración de Cr en las aguas residuales no debe sobrepasar de 20 mg/L y, utilizando el método de tratamiento propuesto en el presente trabajo, se lograrían efluentes cuyas concentraciones de Cr serían inferiores a las que establecen las normas de vertimiento cubanas.

Como último aspecto que se refleja en la Figura 5b, aparece el comportamiento de la eficiencia de remoción de Cr en el proceso de tratamiento

con la utilización del reactor. Se puede observar que los valores son superiores al 95 %, no existiendo diferencias estadísticamente significativas al comparar entre sí las eficiencias obtenidas a concentraciones iniciales de 60 y 100 mg/L, pero sí existen diferencias al comparar estas concentraciones con la de 20 mg/L, siendo ésta última la que mostró los mejores resultados, con el 98 % de Cr removido durante las 12 h de operación del reactor.

Estos resultados fueron mejores que los reportados por Park y cols. /18/ al estudiar la remoción de Cr empleando biomasa de *Ecklonia*, en que lograron una remoción menor al 80%, a un pH de 4 y 100 mg Cr/L de concentración inicial.

Lo mismo pasa al compara el estudio con los realizados anteriormente por Pellón y col/19/ en el cual se alcanzó hasta 92% de remoción de Cr para un tiempo de retención hidráulica de 48 horas a un pH de 9.2 con 80 y 90 mg Cr/L de concentración inicial.

El comportamiento seguido por el cultivo y, como resultado de éste, el manifestado por el pH descrito anteriormente, provoca que la forma de remoción de cromo más favorecida en este proceso sea la precipitación como hidróxido comparada con la adsorción y/o absorción del metal por el cultivo.

Este razonamiento se basa en el rápido ascenso que experimentan los valores de pH una vez que el agua residual entra al reactor.

Esto se corrobora con los resultados del balance de materiales realizado entre las concentraciones de Cr presentes en el efluente del sistema de tratamiento, el lodo obtenido en el fondo del reactor y en la biomasa inmovilizada en el cilindro, los que se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. BALANCE DE MASA PARA CROMO TOTAL

Condiciones		Concentración (mg/L)	Volumen (L)	Masa de Cr (g)
Agua residual afluente al reactor		20,00	150	3,00
		60,00	150	9,00
		100,00	150	15,00
Agua residual efluente del reactor	Cr ₍₂₀₎	0,26±0,013	150	0,04±0,02
	Cr ₍₆₀₎	2,27±0,10	150	0,34±0,02
	Cr ₍₁₀₀₎	3,35±0,18	150	0,50±0,03
Lodo producido en el reactor	Cr ₍₂₀₎	786±5,76	3,50±0,28	2,75±0,20
	Cr ₍₆₀₎	794±7,10	10,40±0,32	8,26±0,25
	Cr ₍₁₀₀₎	805±4,49	17,35±0,37	13,97±0,32
Biomasa inmovilizada en el soporte		BI (g)	CB (mg/g)	Masa (g)
	Cr ₍₂₀₎	459±5,50	0,46±0,02	0,21±0,02
	Cr ₍₆₀₎	470±9,20	0,86±0,02	0,40±0,03
	Cr ₍₁₀₀₎	454±8,70	1,15±0,02	0,52±0,03

Leyenda: Cr₀: Concentración inicial de Cr en disolución; BI: Biomasa inmovilizada (base seca); CB: Concentración de Cr presente en la biomasa.

Del balance de Cr que se muestra en la tabla anterior, se obtiene como resultado, que en la biomasa inmovilizada se retiene entre 0,46 y 1,15 mg Cr/g biomasa, lo que representa entre el 4,0 y el 7,0 %, del Cr removido por el reactor, indicando que el restante (93 al 96 %) se remueve por precipitación en forma de lodo.

Gupta y cols. /20/, estudiando la biosorción de Cr (VI) con *Spirogyra sp* alcanzaron una remoción máxima de 14,7 mg Cr/g de biomasa. Sin embargo, debido al mecanismo que rige este proceso (la biosorción), la mayoría del Cr se mantuvo retenido en la biomasa, a diferencia de lo aplicado en el presente trabajo, en que el interés estaba encaminado a precipitar el Cr en forma de un lodo de hidróxido de cromo III, permitiendo recogerlo y separarlo del medio mediante una sencilla operación.



Conclusiones

1. Las concentraciones de cromo empleadas no ocasionaron afectaciones perceptibles en el proceso fotosintético ni en el crecimiento de *Scenedesmus obliquus* en estado inmovilizado.

2. La forma de remoción de Cr más favorecida fue la precipitación, lográndose valores de pH de 10,1 para un tiempo de retención hidráulica de 12 h, lográndose porcentajes de remoción del metal mayores del 95 %.

3. Para una concentración inicial de 20 mg Cr/L, se lograron concentraciones inferiores a 2,00 mg/L, valor correspondiente al Límite Máximo Permisible Promedio establecido en la normatividad cubana, lo que permitiría el vertimiento seguro al medio ambiente de estas aguas residuales.



Bibliografía

- PINZÓN-BEDOYA, M. L.; L. E. VERA. "Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja". *Dyna*. Vol. 76. Núm. 160, diciembre 2009, pp. 95-106.
- SALAZAR-LUGO, R. "Estado de conocimiento de las concentraciones de cadmio, mercurio y plomo en organismos acuáticos de Venezuela". *REDVET*. Vol. 10, N° 11 ISSN: 1695-7504, 2009.
- CUIZANO, N.A.; A.E. NAVARRO. "Bisorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a baja concentraciones". *An. Quím*, 104(2), 2008, pp. 120-125.

4. CHABALINA, L.; G. Díaz. "Manejo de residuales galvánicos en Cuba con vistas de tecnologías limpias". *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cancún. México, 2002.
5. ALOMÁ, I. C. *et al.* "Propuestas de uso combinado de medidas de minimización y tratamiento a residuales vertidos por el taller galvánico de la Empresa INPUD de Santa Clara". *III Simposio Internacional de Química*. Junio 2007. Santa Clara. Cuba
6. FRADES, J.; J. BOLÍVAR; S. GARCÍA; A. SANTIESTEBAN. "Proyecto: Viabilidad técnico económica del tratamiento integral de los residuales de la Empresa Yuri Gagarin". Programa territorial científico técnico de desarrollo sostenible. La Habana. Cuba, 2009.
7. Pellón, A. "Tecnología para el tratamiento de efluentes galvánicos crómicos con el uso de microalgas inmovilizadas". Tesis. La Habana, 2010.
8. NORMA CUBANA 24:1999. Eliminación de contaminantes en talleres galvánicos. Parámetros de vertimiento. ONN. La Habana, Cuba.
9. NORMA CUBANA 27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. ONN. La Habana, Cuba.
10. CINVESTAV. *Catálogo de cultivos microbianos*. México, D.F.: CINVESTAV-IPN. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, 1982.
11. APHA/AWWA/WEF. *Standard methods for the examination of water and waste water*. 20 th edition. Washington, 2000.
12. MACÍAS, O. *Química del agua*. Empresa Nacional de Producción del Ministerio de Educación Superior (ENPE). La Habana. Cuba, 1990.
13. FAGUNDO, J. R.; J. J. VALDÉS; J. E. RODRÍGUEZ. *Hidroquímica del Karst*. Ediciones Osuna. Granada, 1996. ISBN: 84-921345-8-X.
14. BOROWITZKA, M. A.; L. J. BOROWITZKA. *Microalgae Biotechnology*. University Press, Cambridge, 1988.
15. ROMERO, T. *Curso Internacional: biotecnología de las microalgas*. Centro de Investigaciones Pesqueras. La Habana. Cuba, 2000.
16. TRAVIESO, L. *et al.* "Remoción de Metales Pesados Mediante Microalgas Inmovilizadas". *Revista CNIC* 26. No. Especial XII Seminario Científico CNIC. La Habana, 28 - 30 julio, 1995.
17. ROMERO, T. Tratamiento de efluentes de la industria pesquera mediante *Chlorella bulgaris*. Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana. Cuba, 2006.
18. PARK, D.; Y. S. YUN; J. M. PARK. "Reduction of Hexavalent Chromium with the Brown Seaweed *Ecklonia Biomass*". *Environ. Sci. Technol.* 38 (18), 2004, pp. 4860-4864.
19. PELLÓN, A.; M. RODRÍGUEZ; O. GONZÁLEZ; J. FRADES. "Remoción de cromo mediante el uso de un bioreactor utilizando *Scenedesmus obliquus* inmovilizado". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XXXII. No. 1, p. 13-20
20. GUPTA, V. K.; A. K. Shrivastava; N. Jain. "Biosorption of Chromium (VI) from Aqueous Solutions by Green Algae *Spirogyra* species". *Water Research*. Vol. 35, 2001, pp 4079-4085.