



Evaluación de un consorcio microbiano en la remoción de Cr (VI) en agua sintética

Gómez Castelán Ana Victoria Selene, Espinoza-Castañeda Marisol*, Castañeda Briones María Teresa, Valladares Rodríguez María Rita, Flores Valverde Erasmo

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

*Autor para correspondencia: marisol.ec.uam@gmail.com

Recibido:

16/agosto/2019

Aceptado:

06/noviembre/2019

Palabras clave:

Cr (VI), Bioacumulación, consorcio microbiano.

Keywords:

Cr (VI), bioaccumulation, microbial consortium.

RESUMEN

La biorremediación es una técnica cada vez más utilizada para la remoción de metales pesados como el cromo hexavalente Cr (VI) en agua, este metal es de gran prioridad ya que principalmente se incorpora en el agua debido a la descarga de desechos industriales, es de gran persistencia y altamente tóxico. Debido a lo anterior en este trabajo se presentan los resultados de un proceso de biorremediación de Cr (VI) en agua sintética donde se compara la eficiencia de *Pseudomonas putida* contra *Saccharomyces cerevisiae* por separado mediante biosorción y bioacumulación, en donde las remociones más altas se obtuvieron con el proceso de bioacumulación, siendo de 39.03% y 75.17%, respectivamente. Por lo que posteriormente se utilizó esta técnica para la evaluación de los microorganismos en conjunto, donde se removió un 94.06% de Cr (VI). La cuantificación del metal se realizó mediante espectrofotometría de ultravioleta visible (UV-vis).

ABSTRACT

Bioremediation is an increasingly adopted technique used in the removal of heavy metals, such as hexavalent chromium (Cr (VI)) in water, which is a high priority metal, since it is incorporated mainly in water due to the discharge of industrial waste. It is considerably persistent and highly toxic. Therefore, in this work the results of a bioremediation process of Cr (VI) in synthetic water are presented, where *Pseudomonas putida* against *Saccharomyces cerevisiae* through biosorption and bioaccumulation are compared separately. The highest removal was obtained with the bioaccumulation process, being 39.03% and 75.17%, respectively. Consequently, this technique was used for the evaluation of both microorganisms together, where 94.06% of the Cr (VI) was removed. The quantification of metal was done by using ultraviolet-visible spectrophotometry (UV-vis).

Introducción

La presencia de metales pesados en el ambiente es uno de los problemas ambientales de gran prioridad, ya que aumentan su concentración debido a las actividades antropogénicas, estos permanecen en el ambiente interaccionando en el medio y pueden acumularse en los organismos presentes causando afectaciones a la flora y fauna, así como la salud de las personas (Baranwal et al., 2013; Miranda y Quiroz, 2013; Reyes et al., 2016).

Particularmente el cromo es un metal pesado tóxico, persistente y no biodegradable; el cual se incorpora en los ambientes acuáticos como Cr (III) y cromo hexavalente Cr (VI) a través de la descarga de efluentes industriales tratados de manera inadecuada, provenientes de procesos de cromado, curtido de pieles, producción de pigmentos, fertilizantes y para la preservación de madera, entre otros (Vendruscolo et al., 2017; Salgado et al., 2015).

Las afectaciones a la salud debido a la exposición al Cr dependerán de su estado de oxidación, así como del tipo de exposición y la vía de exposición ya sea: dérmica, por ingesta o inhalación (Cuberos et al., 2009).

El Cr (III) es un elemento esencial para el metabolismo de los organismos y es menos nocivo que el Cr (VI). Por otro lado, el Cr (VI) es el de mayor riesgo ya que es la forma más tóxica, es capaz de atravesar las membranas biológicas con gran facilidad causando afectaciones a los organismos presentes en el ecosistema, es prioritario por ser carcinogénico y mutagénico (Becerra-Torres et al., 2014; Cuberos et al., 2009).

Se ha demostrado que el consumo humano de agua contaminada con altas concentraciones de Cr (VI) puede ocasionar graves daños a la salud como: debilidad del sistema inmune, úlceras, enfermedades hepáticas, gástricas o incluso cáncer (Cheung y Gu, 2007; Molina et al., 2010).

Debido a lo anterior actualmente se emplean procesos fisicoquímicos de remoción de Cr (VI) como la precipitación química, adsorción, intercambio iónico entre otros, pero estos requieren el uso de productos químicos los cuales generan desechos que deben ser posteriormente tratados o confinados implicando así altos costos (Bhattacharya y Gupta, 2013; Yin et al., 2018). Razón por la cual es necesario desarrollar metodologías eficientes, económicas y respetuosas con el medio ambiente para la remoción de Cr (VI) presente en agua.

Es por ello que han surgido tratamientos alternativos como la biorremediación, la cual consiste en el uso de microorganismos o plantas para remover o degradar contaminantes. Dos de los procesos más importantes en la biorremediación microbiana son la biosorción y la bioacumulación. Ambos procesos han demostrado poseer potencial para la remoción de metales (Bajpai et al., 2010; Zinicovscaia et al., 2016; Abbas et al., 2014). Estos procesos consisten en la captura de los iones metálicos, la diferencia radica en la forma en que se lleva a cabo. La biosorción se caracteriza por el uso de células inactivadas, en este proceso los iones metálicos se adsorben en la superficie de la célula al interaccionar con los grupos funcionales de esta, es un proceso pasivo ya que no depende del metabolismo del microorganismo y por lo tanto no requiere energía. Por otro lado, el proceso de bioacumulación emplea células activas y depende del metabolismo del microorganismo, se lleva a cabo en dos etapas: la primera consiste en la adsorción superficial del ion metálico, en la segunda se lleva a cabo el transporte del metal al interior de la célula, reduciendo la disponibilidad del contaminante en el medio (Soares y Soares, 2013; Gupta et al., 2016; Hansda et al., 2016).

La biorremediación microbiana ha demostrado ser benéfica en la biorrestauración del medio ambiente, ya que presenta altas eficiencias que permiten la remoción de metales a bajas concentraciones, en la mayoría de las ocasiones los contaminantes se transforman en compuestos menos dañinos, además de incluir técnicas económicas y respetuosas con el ambiente (Ojuederie y Babalola, 2017; Garzón et al., 2017).

Los microorganismos más utilizados en la biorremediación microbiana de metales pesados son las algas, bacterias, hongos filamentosos y levaduras ya que poseen la capacidad de descontaminar el medio ambiente logrando inmovilizar los contaminantes o incorporarlos en sus procesos metabólicos (Vendruscolo et al., 2017).

Particularmente las bacterias presentan una mayor población tanto en suelo como en agua, su rápido desarrollo, así como su facilidad de crecimiento las coloca como una alternativa para los procesos de biorremediación; algunos géneros bacterianos que han mostrado capacidad para remover metales como Cd, Cu, Pb y Cr son: *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Streptomyces* (Gupta et al., 2016). Por otra parte, las levaduras también se usan de manera eficiente en la remoción de metales pesados, ya que poseen la capacidad de remediar ambientes al unir iones metálicos a su superficie al igual que bioacumularlos y presentan la ventaja de que se producen a gran escala (Moreno-Rivas et al., 2016).

En particular en este trabajo se emplearon dos diferentes microorganismos: la bacteria *Pseudomonas putida* CDBB-B-1299 (*P. putida*) y la levadura *Saccharomyces cerevisiae* marca LESAFFRE (*S. cerevisiae*).

P. putida es una bacteria aerobia, Gram negativa con morfología de bacilo corto la cual puede presentarse en diversos ambientes debido a que no tiene grandes requerimientos nutricionales, muestra resistencia a condiciones ambientales extremas. Como *P. putida* no es una bacteria considerada como patógena, ha sido altamente estudiada ya que muestra una gran resistencia a la presencia de compuestos tóxicos (Poblete-castro et al., 2012; Timmis, 2002).

Por otro lado, *S. cerevisiae* presenta morfología de células alargadas elipsoidales, además que puede ser aislada del medio ambiente (Stanilă, 2013). Esta levadura ha demostrado ser buen agente biosorbente para la remoción de metales pesados y radionúclidos (Cd, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, U, Th) en efluentes (Infante et al., 2014; Labuto et al., 2014).

En este trabajo se presenta la eficiencia en la remoción de Cr (VI) en agua sintética empleando *P. putida* y *S. cerevisiae* tanto de manera individual, como en consorcio microbiano.

Metodología

Se evaluó cada microorganismo en los procesos de biosorción y bioacumulación; para el caso de bioacumulación con *P. putida* se utilizó un cultivo joven con un tiempo de incubación de 16 horas y una concentración de 36.18×10^8 UFC/mL; para el caso de *S. cerevisiae* se evaluó el microorganismo estando liofilizado (seco) con una concentración de 48×10^8 UFC/mL.

Inactivación de los microorganismos

El proceso de biosorción implica el uso de los microorganismos inactivados, lo cual se verificó mediante la ausencia de desarrollo bacteriano. Para lo cual se evaluó la eficiencia de dos tratamientos, el primero consistió en la inactivación por medio de esterilización en calor húmedo, para ello se esterilizaron 3 tubos con 5 mL del cultivo bacteriano en una autoclave a 15 psi y 121°C durante 15 minutos; el segundo tratamiento consistió en la inactivación por calentamiento en baño María, para ello se colocaron 3 tubos con 5 mL del cultivo bacteriano en baño María a 85°C durante 1 hora.

Se verificó la eficiencia de cada tratamiento mediante resiembras de los microorganismos inactivados, para *P.*

putida se resembró en cajas de agar de soya tripticaseína y tubos de caldo Luria Bertani (CLB) estériles, mientras que *S. cerevisiae* se resembró en cajas de agar y tubos de caldo dextrosa Sabouraud (CSD). Posteriormente los tubos y las cajas se incubaron para ver si mostraba desarrollo, para *P. putida* se incubaron en un periodo de 24 a 48 horas, mientras que para *S. cerevisiae* se incubaron en un periodo de 48 a 72 horas. Se seleccionó el tratamiento que mostró una completa inactivación del microorganismo, respectivamente.

Determinación de la curva de calibración para el Cr(VI)

Para ello se prepararon 100 mL de una solución de Cr (VI) de 500 mg/L a partir de dicromato de potasio, posteriormente se prepararon 25 mL de una solución 0.02 M de difenilcarbazida disuelta en acetona, ésta se colocó en una botella ámbar, se protegió de la luz con papel aluminio y se almacenó a 4 °C hasta su utilización. Por otra parte, se prepararon diluciones a partir de la solución de Cr, se manejaron concentraciones de 0 mg/L a 50 mg/L con incrementos de 10 mg/L.

Una vez preparadas las diluciones se ajustó el pH a 2 utilizando H₂SO₄ 2M, a continuación, se tomaron 300 µL de cada concentración para posteriormente adicionarle 200 µL de difenilcarbazida y después aforar a 10 mL con agua desionizada. Esto se realizó por triplicado. Se transfirieron 300 µL de cada concentración a una placa de 96 pocillos y se midió su absorbancia a una longitud de onda de 540 nm.

Optimización de parámetros para el proceso de remoción de Cr (VI)

Se optimizaron parámetros como pH, tiempo de contacto, velocidad de agitación y concentración de los microorganismos, para lo cual se prepararon reactores de vidrio donde se colocó el medio de cultivo, el microorganismo a evaluar, así como la solución de Cr (VI) con una concentración final del reactor de 30 mg/L.

pH

Para seleccionar el valor de pH en el cual se maximizaba la eficiencia en los procesos de remoción de los metales, se evaluaron los valores de 2, 4, 5 y 6. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que a pH de 5 hay mayor eficiencia en la remoción de metales por *P. putida* y *S. cerevisiae* ya que en los otros pH la remoción muestra menor eficiencia en 24 horas.

Tiempo de contacto

Se evaluaron distintos tiempos de contacto iniciando con 30 min y hasta 240 min, observándose que no eran suficientes para la remoción, por lo que se decidió ampliar el tiempo hasta 24 horas como máximo.

Agitación

Se llevaron a cabo los procesos de remoción en presencia y ausencia de agitación, resultando que la remoción únicamente se lleva a cabo cuando hay agitación (40 rpm) durante el periodo de incubación.

Concentración óptima de microorganismos

Primeramente, se evaluaron los procesos con una concentración de 3.0×10^8 UFC/mL correspondiente al estándar 1 de la escala de McFarland, ésta se fue aumentando hasta encontrar la concentración con la cual se tenía una mayor eficiencia en la remoción, que fue de 30×10^8 UFC/mL valor que corresponde al estándar número 10 de la escala de McFarland. En particular para *P. putida* la concentración con la que se obtuvo una mayor eficiencia en los procesos fue de 36.18×10^8 UFC/mL, mientras que para *S. cerevisiae* fue de 48×10^8 UFC/mL.

Temperatura

Para ambos microorganismos, los procesos de remoción fueron mejores cuando la temperatura fue de 30 °C.

Evaluación de la remoción de Cr (VI)

La remoción del cromo se realizó de acuerdo con el procedimiento que se presenta en la figura 1. En cada experimento realizado se determinó la concentración de Cr (VI) al inicio y al final de cada experimento, para ello se tomaron 6 mL de la solución contenida en cada reactor y se colocaron en tubos Eppendorf para ser centrifugados a 5 G, 5 min a 4 °C. Una vez centrifugados se procedió a retirar el sobrenadante y se colocó en un tubo de ensayo, esto se realizó para poder determinar en él la concentración del metal que no fue removida por el microorganismo, posteriormente se ajustó el pH a 2 utilizando H_2SO_4 2M, para posteriormente formar el complejo entre el Cr (VI) y la difenilcarbazida, al complejo formado se le midió su absorbancia a una longitud de onda de 540 nm, ya que la absorbancia se relaciona directa y proporcionalmente con la concentración del analito.

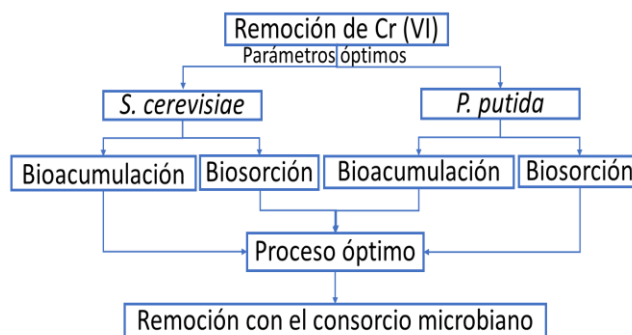


Figura 1. Experimentos a realizar para la selección del proceso óptimo para la evaluación del consorcio microbiano.

Una vez que se determinaron las condiciones óptimas y el proceso más eficiente en la remoción con los microorganismos por separado, se realizó la evaluación de dicho proceso con los microorganismos en conjunto.

Resultados y discusión

Inactivación de los microorganismos

Una vez transcurrido el tiempo de incubación de los microorganismos que fueron resembrados posteriormente al proceso de inactivación, se encontró que para *S. cerevisiae* no hubo desarrollo en ninguno de los dos tratamientos, por lo que la inactivación es efectiva en ambos casos.

En cuanto a *P. putida* se optó por la inactivación por medio de esterilización en autoclave ya que por calentamiento en baño María, se observó desarrollo en los medios inoculados, lo que indica que no se inactivó de manera satisfactoria.

Determinación y cuantificación de Cr (VI)

Para la determinación de Cr (VI), primeramente, se realizó la curva de calibración (figura 2) para las distintas concentraciones de Cr (VI), en esta curva se aprecia el aumento del valor de la absorbancia conforme se da el aumento de la concentración, esto se puede confirmar en la imagen que se presenta dentro de la figura 2, ya que se observa que la coloración del complejo formado aumenta conforme aumenta la concentración de Cr (VI).

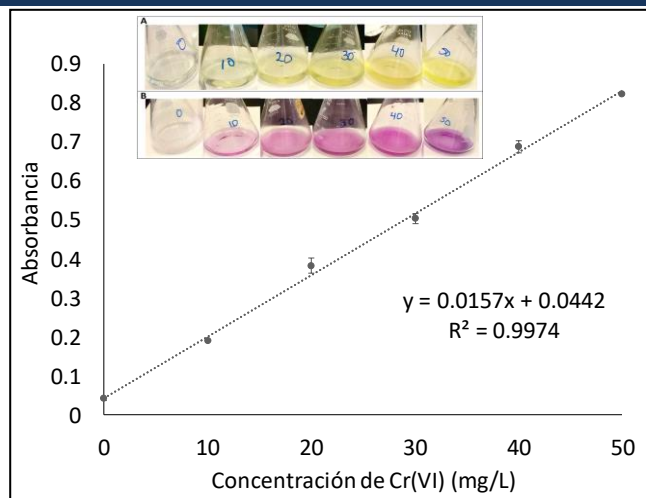


Figura 2. Curva de calibración obtenida para diferentes concentraciones de Cr (VI) mediante UV-vis.

Los respectivos valores de absorbancia obtenidos para cada concentración evaluada se presentan en la tabla 1.

Tabla 6. Absorbancia obtenida para cada concentración de Cr (VI).

Concentración (mg/L)	Absorbancia
0	0.041 ± 0.003
10	0.190 ± 0.000
20	0.382 ± 0.019
30	0.503 ± 0.013
40	0.687 ± 0.015
50	0.820 ± 0.001

Optimización de parámetros para el proceso de remoción de Cr (VI)

Experimentalmente se encontró que los parámetros óptimos del reactor para obtener una alta remoción de Cr (VI) para ambos procesos son: pH 5, agitación constante de 40 RPM, un tiempo de contacto de 24 h a 30°C y concentración total del reactor de *P. putida* de 36.18×10^8 UFC/mL y de *S. cerevisiae* de 48×10^8 UFC/mL, las concentraciones de los microorganismos se determinaron tomando como referencia la escala de McFarland (World Health Organization, 2003).

Los parámetros óptimos fueron aplicados para los procesos de bioacumulación y biosorción.

Evaluación de la remoción de Cr (VI) mediante bioacumulación

P. putida

Se observó que *P. putida* no bioacumulaba al Cr (VI), por lo que fue necesario implementar un proceso de adaptación en presencia de Cr (VI), para ello en un matraz con 40 mL de CLB estéril lo cual garantiza el buen desarrollo de la bacteria, además se adicionaron 3 mL de Cr (VI) de la solución stock de Cr (VI) (500 mg/L), seguido de la adición de 2 mL de *P. putida*. Se midió la absorbancia inicial del cultivo a una longitud de onda de 625 nm, donde el cultivo presentó una absorbancia de 0.0986 ± 0.0015 . El proceso de adaptación se llevó a cabo incubando el matraz a 28°C durante 5 días (Azario, 2014). La adaptación del microorganismo se comprobó mediante la presencia de turbidez y sedimentación en el medio, así como un aumento en la absorbancia a un valor de 1.396 ± 0.0697 , estos resultados fueron indicativos de que la bacteria creció en el medio en presencia de Cr (VI).

Los experimentos de remoción se realizaron aplicando los parámetros óptimos y utilizando a la bacteria adaptada en un cultivo a una concentración de 36.18×10^8 UFC/mL, que fue la que presentó mayor eficiencia en la remoción.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 3, en la gráfica correspondiente al proceso de bioacumulación con *P. putida* (figura 3A), se observa una disminución significativa del valor de la concentración obtenido al inicio del experimento (0 h) y al finalizar el experimento (24 h).

S. cerevisiae

Se trabajó con el microorganismo liofilizado, a una concentración de 48×10^8 UFC/mL ya que con este valor se obtuvo una remoción máxima además que a concentraciones superiores no hay mayor remoción y el microorganismo no se desarrolla.

En la figura 3B se presentan los resultados obtenidos en la remoción de Cr (VI), donde se observa una mayor disminución del valor de la concentración al transcurrir las 24 horas de evaluación.

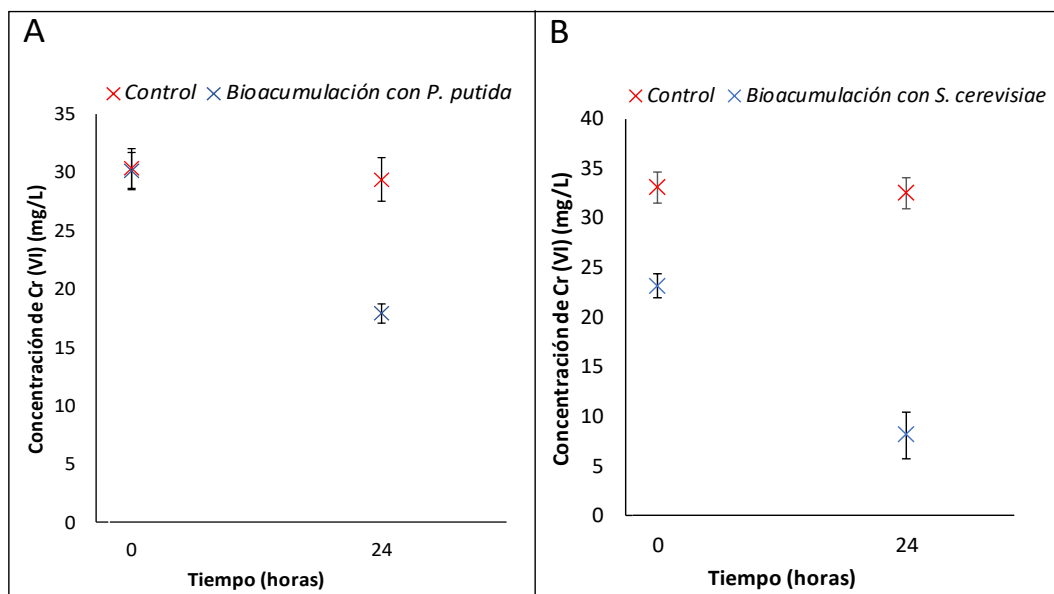


Figura 3. Gráficas comparativas del proceso de bioacumulación de Cr (VI) en presencia y ausencia de: **A.** *P. putida*; **B.** *S. cerevisiae*, a 540 nm de longitud de onda.

En la tabla 2 se presenta la concentración obtenida en los experimentos de bioacumulación, la concentración se obtuvo a partir de la curva de calibración de Cr (VI), así como de las absorbancias obtenidas experimentalmente ya que existe una relación directa y proporcional entre la absorbancia con respecto a la concentración. Para *P. putida* se observa una remoción del 39.03%, en cuanto a *S. cerevisiae* se logró una remoción del 75.17%.

Tabla 7. Concentraciones obtenidas al inicio y final de los experimentos de bioacumulación de Cr (VI) con *P. putida* y *S. cerevisiae*.

Proceso: Bioacumulación				
Microorganismo		Concentración de Cr (VI) (mg/L)		Porcentaje de remoción (%)
		Inicial	Final	
<i>P. putida</i>	Control	30.351	29.414	39.039
	Experimento	30.169	17.930	
<i>S. cerevisiae</i>	Control	32.935	32.389	75.176
	Experimento	23.090	8.040	

Biosorción de Cr (VI)

P. putida

Para la evaluación de este proceso se utilizó la bacteria adaptada al Cr (VI) con concentración de 36.18×10^8 UFC/mL y se inactivó el cultivo por medio de esterilización en autoclave. De manera similar al proceso de bioacumulación se trabajaron con los parámetros óptimos.

Los resultados obtenidos en la biosorción de Cr (VI) para *P. putida* se presentan en la figura 4A donde se observa una mínima disminución en la concentración obtenida a las 24 horas del tiempo de contacto en comparación con el tiempo a las cero horas (control), debido al traslape en las barras de error se puede confirmar que no hubo una remoción de Cr (VI).

S. cerevisiae

En la figura 4B, se observan los resultados obtenidos al emplear *S. cerevisiae* inactivada mediante esterilización, se puede observar una gran disminución en la concentración del Cr (VI) transcurridas las 24 horas del experimento.

Por otro lado, en la figura 4C, empleando *S. cerevisiae* inactivada mediante calentamiento en baño María se observa una menor disminución del valor de la concentración obtenido inicialmente con respecto al obtenido al finalizar las 24 horas de evaluación, confirmando que al utilizar este tratamiento para inactivar al microorganismo se da una menor remoción de Cr (VI).

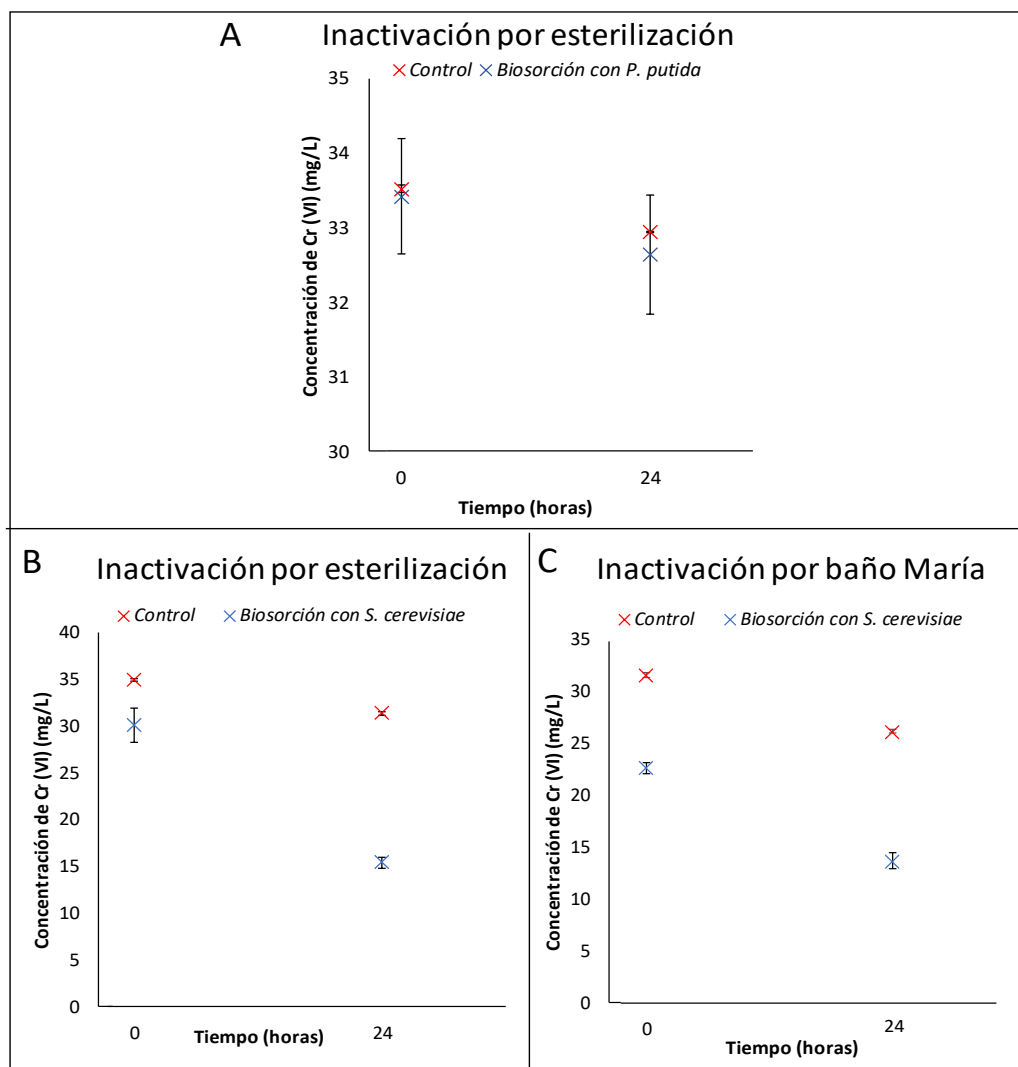


Figura 4. Gráficas comparativas del proceso de biosorción de Cr (VI) en presencia (azul) y ausencia (rojo) de: **A.** *P. putida*, **B.** *S. cerevisiae* inactivada por esterilización, **C.** *S. cerevisiae* inactivada por calentamiento en baño María, a 540 nm de longitud de onda.

En la tabla 3 se presentan los valores de concentración obtenidos para el proceso de biosorción, donde empleando *P. putida* no hubo remoción, mientras que con

S. cerevisiae inactivada por esterilización removió un 50.83% de Cr (VI) y utilizando *S. cerevisiae* inactivada por calentamiento a baño María se removió: 47.59%.

Tabla 8. Concentraciones obtenidas al inicio y final de los experimentos de biosorción de Cr (VI) con *P. putida* y *S. cerevisiae*.

Proceso: Biosorción				
Microorganismo		Concentración de Cr (VI) (mg/L)		Porcentaje de remoción (%)
		Inicial	Final	
<i>P. putida</i>	Control	33.522	32.949	0.934
	Experimento	33.426	32.641	
<i>S. cerevisiae</i> (Esterilización)	Control	35.019	31.452	50.830
	Experimento	30.210	15.464	
<i>S. cerevisiae</i> (Baño María)	Control	31.579	26.165	47.590
	Experimento	22.641	13.713	

Bioacumulación de Cr (VI) empleando el consorcio microbiano

Analizando y comparando los resultados obtenidos en los experimentos de biosorción y bioacumulación, se encontró una mayor eficiencia en la remoción de Cr (VI) con el proceso de bioacumulación con cada microorganismo por separado, por lo que se evaluó el desempeño de los dos microorganismos en conjunto (consorcio microbiano) con este proceso, para ello se prepararon reactores con volumen de 50 mL, la composición de los controles fue de 3 mL de Cr (VI) (500 mg/L), 37 mL de agua, 5 mL de CLB y 5 mL de CSD; la composición de los reactores para los experimentos con el consorcio fue de 3 mL de Cr (VI) (500 mg/L), 22 mL de agua, 5 mL de CLB, 5 mL de CSD, 400 mg de *S. cerevisiae* (concentración de: 48×10^8 UFC/mL) y 15 mL de *P. putida* (concentración de: 36.18×10^8 UFC/mL).

En la figura 5 se presentan las concentraciones de Cr (VI) obtenidas durante la evaluación del consorcio microbiano, el experimento refleja una mayor eficiencia en la remoción del Cr (VI) en comparación con los resultados obtenidos con los microorganismos por separado ya que se obtuvo una disminución más significativa del valor de la concentración.

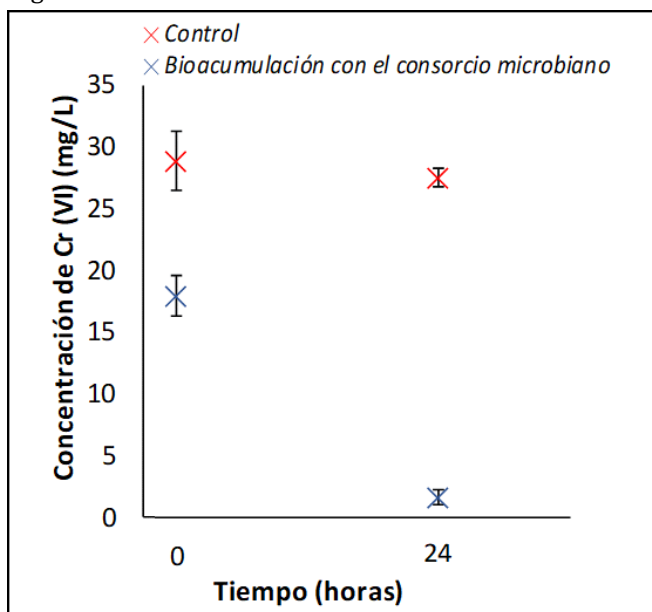


Figura 5. Gráfica de bioacumulación de Cr (VI) con el consorcio microbiano a 540 nm de longitud de onda.

En la tabla 4 se presentan los valores de la concentración obtenidos utilizando las absorbancias de la figura 5, donde se observa que al finalizar el experimento se obtuvo un porcentaje de remoción del 94.06% demostrando que al utilizar el consorcio microbiano se obtiene una mayor eficiencia en la remoción de Cr (VI),

en comparación con el comportamiento obtenido con los microorganismos de manera individual ya que juntos aumentan la eficiencia del proceso.

Tabla 9. Concentraciones obtenidas al inicio y final del experimento de bioacumulación de Cr (VI) con el consorcio microbiano.

Proceso: Bioacumulación				
Microorganismo		Concentración de Cr (VI) (mg/L)		Porcentaje de remoción (%)
		Inicial	Final	
Consorcio microbiano	Control	28.828	27.465	94.063
	Experimento	17.949	1.630	

Conclusiones

Se demostró que el proceso de biosorción empleando *P. putida* no es efectivo para la remoción de Cr (VI), sin embargo, es efectivo al emplear *S. cerevisiae*.

Al realizar los experimentos de remoción con *S. cerevisiae* empleando las dos técnicas para su inactivación y comparando los resultados, se observó que ambas técnicas son efectivas para la remoción; al inactivar por calentamiento en baño María se obtuvo una eficiencia en la remoción del 47.59% mientras que al inactivar por esterilización se obtuvo una eficiencia en la remoción de Cr (VI) del 50.83%.

Los experimentos realizados muestran que el proceso de bioacumulación es en el cual se presenta mayor eficiencia en la remoción de Cr (VI) aplicado a los microorganismos por separado, ya que con *P. putida* se logró remover el 39.03% mientras que con *S. cerevisiae* se logró la remoción del 75.17% de Cr (VI), por lo que este proceso fue el que se aplicó en la remoción con el consorcio microbiano.

Se demostró la gran capacidad de biorremediación del consorcio microbiano, ya que fue capaz de disminuir la concentración del ion metálico en un 94.06% en un tiempo de contacto de 24 horas, comprobando que los microorganismos juntos aumentan la eficiencia del proceso, lo cual hace a esta técnica una metodología altamente eficiente para remover Cr (VI).

Agradecimientos

Selene agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través de la beca número 634392.

Referencias

- Abbas, S.H., Ismail, I.M., Mostafa, T.M., Sulaymon, A.H. (2014). Biosorption of Heavy Metals: A Review. *Journal of Chemical Science and Technology*, 3: 74-102.
- Azario R. (2014). Análisis de la toxicidad de metales contaminantes sobre el crecimiento de *Escherichia coli*: Efecto del cromo, plomo y cadmio en solución. Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Bajpai, A. K., Rai, L. (2010). Removal of chromium ions from aqueous solution by biosorption on the ternary biopolymeric microspheres. *Indian Journal of Chemical Technology*, 17: 17-27.
- Baranwal, A., Praharsa, J., Rauniyar, R., Khadka, R., Kuncham, R., Nagashetti, V. (2013). Bioaccumulation of the heavy and toxic metals by the novel microorganisms, *Global Journal of Biology, Agriculture & Health Sciences*, 2: 106-110.
- Becerra-Torres, S., Soria-Fregozo, C., Jaramillo-Juárez, F., Moreno-Hernández-Duque. (2014). Trastornos a la salud inducidos por cromo y el uso de antioxidantes en su prevención o tratamiento, *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 2: 19-30.
- Bhattacharya A., Gupta, A. (2013). Evaluation of *Acinetobacter sp.* B9 for Cr (VI) resistance and detoxification with potential application in bioremediation of heavy-metals-rich industrial wastewater, *Environmental Science and Pollution Research*, 20: 6628-6637.
- Cheung K. H., Gu, J. D. (2007). Mechanism of hexavalent chromium detoxification by microorganisms and bioremediation application potential: A review, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 59: 8-15.
- Cuberos, E., Rodríguez, A., Prieto, E. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia, *Revista salud pública*, 11: 278-289.
- Garzón, J., Rodríguez-Miranda, J., Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible, *Revista Universidad y Salud*, 19: 309-318.
- Gupta, A., Joia, J., Sood, A., Sood, R., Sidhu, C., Kaur, G. (2016). Microbes as potential tool for remediation of heavy metals: a review, *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 8: 364-372.
- Hansda, A., Kumar, V., Anshumali, (2016). A comparative review towards potential of microbial cells for heavy metal removal with emphasis on biosorption and bioaccumulation, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32: 1-14.
- Infante, C., De Arco, D., Angulo, E. (2014). Removal of lead, mercury and nickel using the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Revista MVZ Córdoba*, 19: 4141-4149.
- Labuto, G., Trama, B., Castro da Silveira, G., de Souza, B., Vitorino, F., Collazo, R. (2014). Metals uptake by live yeast and heat-modified yeast residue. *Ambiente & Agua*, 66: 17-35.
- Miranda, M. G., Quiroz, A. (2013). Efecto del fotoperiodo en la remoción de plomo por *Lemna gibba* L. (*Lemnaceae*). *Polibotánica*, 36:147-161.
- Molina, N., Aguilar, P., Cordovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana, *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8: 77-88.
- Moreno-Rivas, S., Armenta-Corral, R. I., Frasquillo-Félix, M. C., Legarda-Díaz, I., Vázquez-Moreno, L., Ramos-Clamont, G. (2016). Biosorción de cadmio en solución acuosa utilizando levadura de panadería. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15: 843-857.
- Ojuederie, O., Babalola, O. (2017). Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments: A Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14: 1-26.
- Poblete-castro, I., Becker, J., Dohnt, K., Martins, V., Wittmann, C. (2012). Industrial biotechnology of *Pseudomonas putida* and related species. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93: 2279-2290.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16: 66-77.
- Salgado, I., Pérez, J., Carballo, M., Martínez, A., Cruz, M. (2015). Aplicación de rizobacterias en la biorremediación del cromo hexavalente presente en aguas residuales, *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 4: 20-34.
- Soares E. V. Soares H. M. (2013). Cleanup of industrial effluents containing heavy metals: A new opportunity of

valorising the biomass produced by brewing industry, *Applied Microbiology and Biotechnology.*, 97: 6667–6675.

Stanilă, A. (2013). Brewer's Yeast: an Alternative for Heavy Metal Biosorption from Waste Waters. *ProEnvironment.*, 6, 457–464.

Timmis, K. (2002). *Pseudomonas putida*: a cosmopolitan. *Environmental Microbiology.*, 4: 779–781.

Vázquez-Solano, A., Amador-Hernández, J., Colunga-Urbina, E., Ríos-González, L., Garza-Garza, Y., Garza-Rodríguez, I. (2014). Biorremoción de cromo (VI) con biopelículas soportadas en fibra de ixtle en reactores batch, *Revista Iberoamericana de Ciencias.*, 1: 31–37.

Vendruscolo, F., da Rocha, G., Antoniosi, N. (2017). Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms, *International Biodeterioration & Biodegradation.*, 119: 87–95.

World Health Organization. (2003). Manual for the laboratory identification and antimicrobial susceptibility testing of bacterial pathogens of public health importance in the developing world: *Haemophilus influenzae, Neisseria meningitidis, Streptococcus pneumoniae, Neisseria gonorrhoea, Salmonella serotype Typhi, Shigella, and Vibrio cholerae*. 1ª Ed. World Health Organization, p. 209–214.

Yin, K., Wang, Q., Lv, M., Chen, L. (2018). Microorganism remediation strategies towards heavy metals, *Chemical Engineering Journal.*, 360: 1553–1563.

Zinicovscaia, I., Safonov, A., Tregubova, V., Ilin, V., Cepoi, L., Chiriac, T., Ludmila, R., Frontasyeva, M. (2016). Uptake of Metals from Single and Multi-Component Systems by *Spirulina Platensis* Biomass. *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 23: 401-412.