

SEMILLAS DE OPUNTIAS COMO MATERIALES EN LA BIOADSORCIÓN DE CADMIO Y MANGANESO

Francisco Prieto García^a, Noé Trejo García^a, Judith Prieto Méndez^a

^aÁrea Académica de Química. UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo.
prietog@uaeh.edu.mx

RESUMEN

Los metales pesados en medios acuosos están disponibles para los sistemas biológicos. Entre los más perjudiciales se encuentran Pb, Cr, Hg, Mn, Cd, entre otros, altamente tóxicos a todas las concentraciones. Se han desarrollado variadas técnicas para la eliminación de éstos, como la precipitación, oxidación/reducción, filtración, procesos electroquímicos, separación por membrana y evaporación, etc. Es factible además, el empleo de técnicas de adsorción sobre sustratos naturales, como zeolitas, o absorbentes sintéticos como las resinas de intercambio. Por otro lado, las cactáceas están integradas por unas 2000 especies distribuidas en el continente americano, han sido introducidas en lugares de clima muy seco de países de otros continentes. Las condiciones geográficas de México y su particular relieve y variados tipos de suelo, han favorecido la diversificación de estas plantas. Entre otros usos, las cactáceas, son ampliamente utilizadas como alimento humano y forraje, principalmente por sus cladodios y frutos. Las semillas de los frutos son consideradas como desechos, así, semillas de *Opuntia heliabravoana* Sheinvar, *O. cylindropuntia imbricata*, *O. matudae* sp., *O. joconoxtle* y *O. ficus-indica*, pulverizadas o molidas, en condiciones de activación ácida o básica, producen una bioadsorción favorable capaz de reducir las concentraciones de iones de manganeso y cadmio en medios acuosos. De las especies en estudio se pudo concluir que muestran mayor selectividad por bioadsorber Mn que Cd. Se alcanzaron para el manganeso eficiencias de bioadsorción entre 86.3% y 92.8% y para el cadmio entre 51.8% y 66.3%. La máxima eficiencia la presentó la especie *O. ficus-indica* seguido de la especie *O. matudae* para el Mn en tanto que para el Cd la especie *O. matudae*, seguida de la especie *C. Imbricata*. El proceso de desorción resulta inviable en todos los casos por cuanto, estas biomazas no son regenerables para el caso de estos metales.

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios métodos para llevar a cabo la eliminación de metales pesados en soluciones acuosas, por una parte existen los métodos fisicoquímicos que consisten en la precipitación química, oxidación, tratamiento electroquímico, filtración intercambio iónico y tecnología de membranas, las cuales han sido utilizadas ampliamente para remover metales en aguas residuales de las industrias. Estos procesos suelen resultar costosos y se ha cuestionado su efectividad cuando se trata de soluciones acuosas en el orden de 1-100 mg/L [1, 2]. Debido a la limitación que implica la aplicación de métodos fisicoquímicos para el tratamiento de metales tóxicos se ha optado por la aplicación de materiales de origen biológico los cuales además de su bajo costo poseen una alta capacidad de bioadsorción de metales pesados. Entre estos biomateriales se encuentran; bacterias, hongos, levaduras y algas, los cuales debido a su composición química (carbohidratos), poseen porcentajes de captación de los iones, metálicos relativamente altos. Por medio de procesos pasivos como bioadsorción, que es dependiente del grado

de afinidad entre las especies metálicas o sus formas iónicas y los sitios de unión en la estructura molecular de la pared celular, se puede recuperar el metal y reutilizar el bioadsorbente [3]

La aplicación de la bioadsorción en la purificación de aguas residuales presenta un gran potencial, pues las biomásas se pueden obtener fácilmente en grandes cantidades, son económicas, reutilizables, y es posible emplear dos o más de manera simultánea y remover selectivamente diferentes iones metálicos [4]. Se ha utilizado el carbón activado como biomasa para remover el Cd (II) en solución acuosa y el carbón activado obtenido de la mazorca de maíz y la corteza de *Pinus pinaste* [4]. Se ha demostrado que las algas marinas son más eficientes para la remoción de metales pesados cuando están muertas que cuando están vivas, como *Sargassum* spp y *Ascophyllum* spp y éstas han dado buenos resultados como biosorbentes llegando a remociones superiores al 90% del metal de interés en procesos *batch* y continuos. Se analizó el proceso de biosorción en *batch* con hierro, manganeso y cromo, se obtuvieron porcentajes de remoción de 96, 98, 85% respectivamente [5]. Otro método para eliminar Cadmio en aguas residuales es utilizando una cepa modificada genéticamente de *Escherichia coli* con el gen de la metalotioneína 1 de ratón. Se mostró que la bacteria nativa por sí sola remueve el 50% de la concentración presente en un medio contaminado artificialmente, mientras que la bacteria modificada genéticamente sin inducir remueve el 80% de la concentración original de cadmio [6].

Las *Opuntias*, admiradas por sus atractivas flores, extravagantes formas o erizadas espinas, han sido ampliamente explotadas en jardinería, lo que ha llevado a muchas de ellas a encontrarse al borde de la extinción. Un número importante de estas plantas son endémicas de México y su desaparición significa la pérdida total, a nivel mundial. La familia de las cactáceas incluye aproximadamente 2000 especies que se encuentran en lugares de clima desértico, como América central y América del sur. El nopal es el nombre común que reciben las cactáceas del género *Opuntia*; este género y su familia son originarios de América, se carece de fósiles de éstas cactáceas y se piensa que la familia derivó de las portulacáceas. Su origen podría localizarse en México, porque en este país existe el mayor número de géneros e individuos y porque, al contar con un buen relieve, se ha favorecido la diversidad de estas plantas. La mayoría de ellas son utilizadas como alimento humano por sus frutos y hojas; asimismo, forman parte de la dieta de muchos animales [7].

El nopal (*Opuntia* spp) ha representado, para los mexicanos, uno de los bióticos de mayor significado cultural, porque se utiliza como alimento, ya sea como verdura o como fruto, bebida alcohólica, dulce, producto industrial, entre otros. En algunos países de América el nopal ha desempeñado un papel muy importante; en Perú se aprovecha en el cultivo de la cochinilla, y en la zona norte de México, como forraje; en muchos sitios de San Luís Potosí y Zacatecas se suele someter el jugo de tuna a procesos de deshidratación para obtener productos diversos como miel de tuna, cuajado de tuna y queso de tuna. Por eso, el nopal ha adquirido gran importancia actualmente; en la industria se utiliza como anticorrosivo, colorante y caucho. Muchos estados del país dependen del nopal tunero para la subsistencia, y gran cantidad de familias se dedican a cultivarlo y otras a recolectarlo. Al fruto de sabor dulce se le conoce como tuna y al de sabor agrio como xoconostle [8]. Los Estados de México e Hidalgo tienen alto prestigio en cuanto a la calidad de su tuna, la cual proviene de *Opuntia amyclaea* y *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia streptacantha* y *Opuntia leucotracha*; esta tuna se exporta a Estados Unidos, Canadá y Japón [8].

El nopal es una planta con gran capacidad de adaptación al medio, que efectúa mediante modificaciones morfológicas como diferencias en espinas, etc. La composición química de las cenizas de las cactáceas varía según su especie. Los componentes principales son el calcio y el potasio, pero también se encuentra algo de magnesio, sílice, sodio y pequeñas cantidades de hierro, aluminio y manganeso [8]. El nopal puede funcionar desde el punto de vista nutricional, pero puede llegar a ser

tóxico por su contenido de nitratos. Los nutrimentos del nopal varían con la época del año y cambian con los factores ambientales a que están expuestos, como el suelo, la precipitación, la temperatura y la duración del día [8]. Las semillas derivadas de sus frutos son consideradas como desechos, así, las semillas de *Opuntia heliabravoana* Sheinvar, *O. cylindropuntia imbricanta*, *O. matudae sp.*, *O. joconoxtle* y *O. ficus-indica*, pulverizadas o molidas, en condiciones de activación ácida o básica, pueden producir una bioadsorción favorable capaz de reducir las concentraciones de iones de manganeso y cadmio en medios acuosos. Este ha sido el objetivo del trabajo, caracterizar fisicoquímicamente las semillas de *Opuntias* de las especies mencionadas y evaluar la capacidad de sorción en medio ácido, para remover iones de Mn^{2+} y Cd^{2+} en solución acuosa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A las semillas previamente lavadas, secadas y molidas en forma de polvos o granulados se les realizaron los siguientes análisis físicos según se reporta [7].

- Contenido de humedad: gravimétrico [9]
- Contenido de ceniza: sequedad, incineración, y gravimetría [10]
- Densidad por peso Hectolitro [11]
- Densidad por peso mil granos [12]
- Índice de flotación [13]
- Dureza por abrasión [11]
- Determinación de volumen unitario [13]

Las muestras de semillas ya pulverizadas, se sometieron a las determinaciones fisicoquímicas:

- Contenido de grasas totales: método de extracción en equipo Soxhlet [9]
- Contenido de proteínas: método Kjeldahl para determinación de nitrógeno [9].
- Contenido de carbohidratos totales: método de cálculo por diferencia [13, 14]
- Contenido de azúcares: método de azúcares reductores totales, directos y sacarosa [15]
- Contenido de fibra total o fibra bruta y contenido de fibra soluble e insoluble [9]
- Contenido de elementos metálicos: sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio, zinc, cadmio, cromo, plomo, mercurio y arsénico: método de espectroscopía de absorción y/o emisión atómica, posterior a una mineralización total [9]

Para el acondicionamiento de los polvos de semillas de cada especie se procedió a obtenerlos en tamaños de partícula entre 50-100 micrómetros a través de tamizados en mallas de la marca Tyller y molidos en micromolino de laboratorio. Se sometieron a proceso de activación y para ello fueron sumergidos en una disolución ácida de HCl 1.00 M, con agitación a 100 rpm y a temperatura ambiente durante 1 hora. Se filtraron a vacío y se lavaron con agua destilada sobre el propio filtro, se secaron a temperatura ambiente, inicialmente al aire y posteriormente en desecadoras con silicagel. Después se pulverizaron los grumos formados y se reservan para pruebas de biosorción.

Para determinar el tiempo de contacto se realizó la cinética de sorción, colocando una fracción de los polvos de las semillas de cada variante de *Opuntias* previamente activadas, en soluciones conteniendo concentraciones iguales de los iones Mn^{2+} y Cd^{2+} a niveles de $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a pH 4, 6 y 8 (pH de las aguas residuales) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Se colocaron 10 mL de la solución con el analito en un tubo de ensayo, adicionándose 0.10 g del material adsorbente (relación 100:1) y se mezcló la solución con el adsorbato y el adsorbente a 50 rpm a diferentes tiempos (1, 2, 5, 15, 24, 48, 72, 96 horas) y se cuantificó la concentración de Mn^{2+} y Cd^{2+} remanentes en las aguas mediante análisis químico espectroscópico. Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente

(ICP) Perkin Elmer modelo Óptima 3000XL. Para evaluar la eficiencia de la eliminación de los iones Mn^{2+} y Cd^{2+} en las columnas empacadas con los polvos de semillas de *Opuntias* activadas, se utilizó la siguiente fórmula denominada ecuación 1:

$$\text{Porcentaje de eficiencia} = 100 - \left[\frac{[Me^{n+}]_F}{[Me^{n+}]_I} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Donde: $[Me^{n+}]_F$ es la concentración de catión metálico, F es la concentración final remanente después del proceso de depuración e I es la concentración inicial de cationes presente en la muestra contaminada.

Una vez obtenidas las condiciones experimentales óptimas para la eliminación de iones Mn^{2+} y Cd^{2+} de las soluciones acuosas, para la cuantificación se llevó a cabo el monitoreo de los metales pesados retenidos en las biomásas según el tratamiento aplicado en los materiales sorbentes y de los experimentos confirmatorios.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los primeros resultados de los análisis físicos se obtuvieron por observación visual al microscopio al evaluar las semillas de cada especie de *Opuntias*, secadas y limpias (figuras 1 a la 5), en un corte longitudinal y un corte transversal. Así se obtuvo un criterio de evaluación del tamaño de las semillas, espesor de sus pericarpios y el endospermo.

Como se aprecia en cuanto a dimensiones y tamaño, en el corte longitudinal, la semilla más grande es la de la especie *C. imbricata*, seguidas en orden decreciente por las especies *O. ficus-indica*, *O. joconostle*, *O. matudae* y *O. helabravoana*. Por su parte, el espesor del pericarpio es más grueso en la especie *C. imbricata*, seguido en orden igualmente decreciente de las especies *O. ficus-indica*, *O. matudae*, *O. joconostle* y *O. helabravoana*. Se puede notar que al mismo tiempo, el pericarpio más rugoso y de apariencia más fibroso corresponde también al de la especie *C. imbricata*. Esto puede ser indicativo de ser una semilla relativamente blanda. Así mismo de la observación de los endospermos, se puede hacer notar que esta especie presenta poco volumen y no muy compacto, lo cual indicaría poco peso específico. Desde el punto de vista físico son diferentes en sus formas, sobre todo si se observan los cortes longitudinales. Esto puede ser una contribución a los métodos de clasificación taxonómica de las especies. Por su parte la especie *O. helabravoana* siendo la más pequeña muestra un endospermo relativamente voluminoso y compacto lo que deberá representar un elevado peso específico.

Los resultados de los análisis de caracterización física se muestran en la tabla 1. Podemos apreciar que los mayores valores de densidad por peso hectolitro (DPH) se encuentran en la especie *O. helabravoana* y se corresponde con los valores de mayor dureza o resistencia a la abrasión, así como el menor volumen de la semilla, en correspondencia con lo observado en las microfotografías. Esto es indicativo que en efecto, su estructura es más sólida y compacta, lo que sugiere la idea además de que es poco porosa. Por otra parte, la especie *O. joconostle* F.A.C. Weber presentó el mayor valor de densidad por peso de mil granos (DPMG) y se corresponde a la menor resistencia a la abrasión y a la menor densidad por índice de flotación (DIF), esto indica que sus semillas son más blandas, más pesadas en sus masas relativas y poco porosas dado el bajo valor de la DIF. La especie *O. ficus-indica* es la menos pesada (bajos valores de DPH y DPMG), es blanda y aparentemente es de las más porosas de todas las especies estudiadas y una de las de mayor volumen relativo.

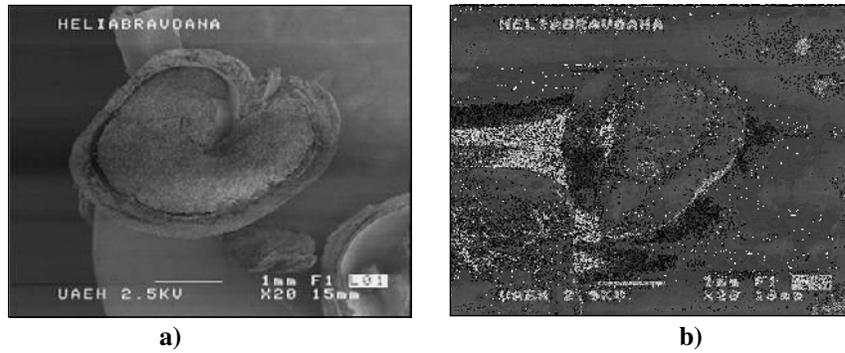


Figura 1. Microfotografía de la semilla de *O. heliabravoana* a) Corte longitudinal y b) Corte transversal

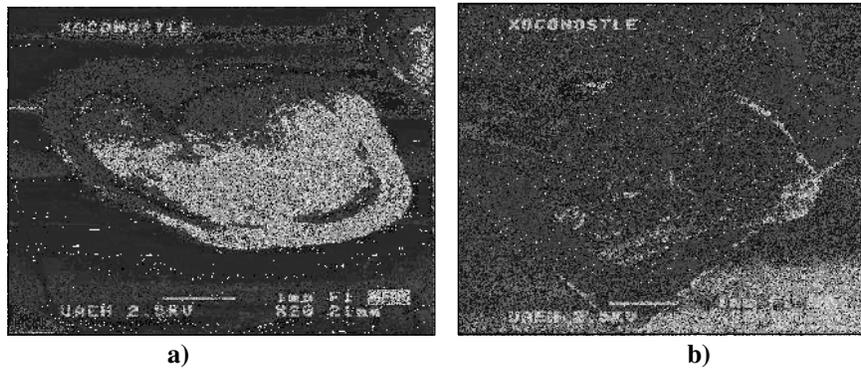


Figura 2. Microfotografía de la semilla de *O. joconoxtle* F.A.C. Weber. a) Corte longitudinal y b) Corte transversal

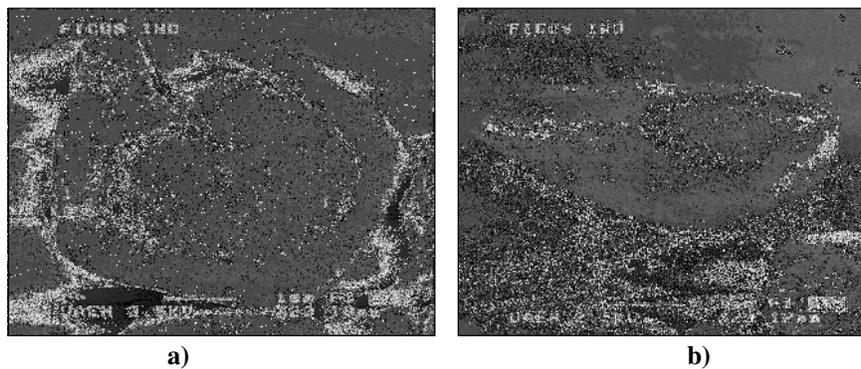


Figura 3. Macrofotografía de la semilla de *O. ficus*. a) Corte longitudinal y b) Corte transversal

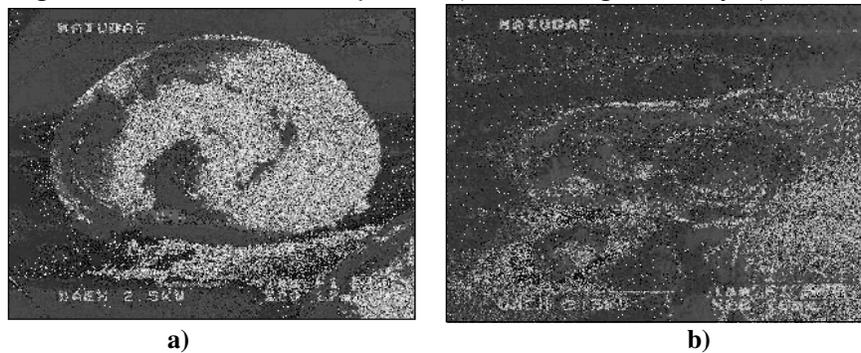


Figura 4 Microfotografía de la semilla de *O. O.maudae* Scheinvar. a) Corte longitudinal y b) Corte transversal

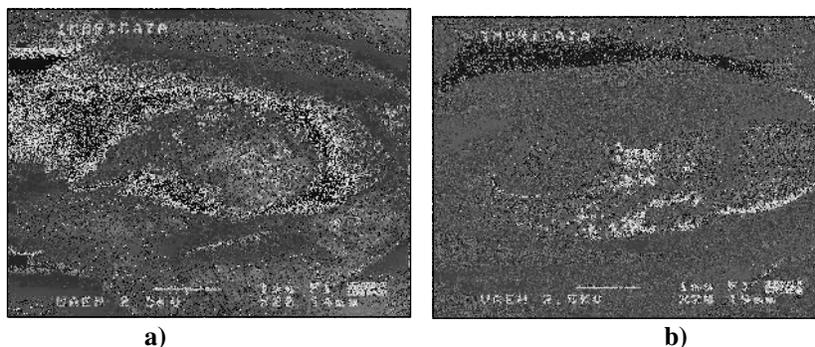


Figura 5. Microfotografía de la semilla de *C. imbricata*. a) Corte longitudinal y b) Corte transversal

Tabla 1. Evaluación de parámetros físicos de los granos o semillas de las cinco especies de *Opuntias* en estudio. (Desviación estándar de las mediciones)

Especie	DPH (kg/HL)	DPMG (g/1000)	DIF	DzaA	Vol (mm ³)
<i>O. heliabravoana</i>	65.29 (8.48)	17.03 (0.25)	14.80 (1.88)	15.93 (1.24)	12.13 (1.08)
<i>O. joconoxtle</i> F.A.C. Weber	64.22 (9.09)	29.19 (1.33)	16.80 (0.99)	7.42 (1.02)	19.16 (0.99)
<i>O. ficus-indica</i>	54.97 (1.33)	13.43 (0.05)	23.21 (2.02)	7.59 (0.40)	28.70 (3.26)
<i>O. matudae</i>	64.05 (12.30)	25.45 (0.24)	18.20 (6.40)	15.46 (4.76)	17.90 (1.90)
<i>C. imbricata</i>	55.51 (5.60)	25.48 (1.32)	49.60 (4.63)	11.64 (2.75)	31.20 (4.50)

DPH: Densidad Peso Hectolitro (kg/HL)

DPMG: Densidad peso mil granos (g/1000 granos)

DIF: Densidad por índice de flotación (% granos flotantes)

DzaA: Dureza por abrasión (% peso perdido por abrasión)

Vol: Volumen del grano (mm³)

Con relación a la DPH se puede señalar que las especies estudiadas *O. heliabravoana*, *O. joconoxtle* F.A.C. Weber y *O. matudae* resultaron similares, con valores superiores a 64.0 kg/HL en tanto las especies *O. ficus-indica* y *C. imbricata* presentaron valores de 55.0 kg/HL aproximadamente. En México no existe una norma que establezca un valor relativo para estos parámetros en estas semillas, pero si se compara con lo establecido por la NMX-FF-043-SCFI-2003 para los granos de cebada de seis hileras y que es de 56 kg/HL, se puede inferir por simple analogía que se encuentran dentro de los rangos admisibles. En cuanto a DPMG las especies *O. joconoxtle*, *O. imbricata* y *O. matudae* presentaron valores a 25-30 g/1000 granos y las dos restantes, con valores menores de 15-20 g/1000 granos. El peso mil granos en la cebada suele variar de 20-50 g según criterios de algunos autores [16] en general para muchos granos y semillas estos son valores normales, en este caso los valores de DPMG encontrados en las especies de las semillas en estudio resultan ligeramente más bajos. Un valor menor del índice de flotación (DIF) indica que en el endospermo de las semillas existen menos poros de aire o huecos, lo cual las hace más compactas y sólidas y esto, ayuda a disminuir el número de granos flotantes. Este es el caso de la especie *O. heliabravoana*.

Los resultados del análisis proximal, se muestran en la tabla 2. Las cinco especies presentan niveles similares en humedad (entre 1.92-4.09%) y contenido de cenizas (entre 0.92-1.03%), este último parámetro asociado a los niveles de metales que pueden contener. Las especies estudiadas, al tener un contenido de humedad muy bajos, implican que pueden ser menos propensas a deteriorarse. La

pequeña variación observada en los contenidos de cenizas (relativamente bajos), como material inorgánico, entre las especies de semillas puede estar influenciada por la composición del suelo en el cual fueron cultivadas cada una de ellas, los fertilizantes utilizados y otros factores ambientales [17]. Así mismo, los contenidos en fibra bruta total y carbohidratos (CH) las hacen similares (entre 2.56-3.52% y 72.62-82.25%, respectivamente). Las cinco especies presentan significativos porcentajes en grasas, destacándose por los más altos valores la especie *O. joconoxtle* ; esto puede ser indicativo de que por altos contenidos en CH y grasas pudieran servir para elaborar algún complemento alimenticio, siempre y cuando se evalúen los tipos de grasas y no afecten. Por sus bajos contenidos proteicos no serían interesantes como alimento, a menos de que sean enriquecidos.

Tabla 2. Resultados de los análisis proximales expresados en porcentaje (%). Entre paréntesis se muestran los resultados de la desviación estándar

Cultivo	Humedad	Cenizas	Grasa	F. bruta total	Proteínas	CHOS
<i>O. matudae</i>	3.01 (0.52)	0.92 (0.07)	10.39 (0.33)	3.47 (0.13)	1.69 (0.11)	79.51 (0.37)
<i>C. imbricata</i>	1.92 (0.14)	0.98 (0.10)	10.78 (0.74)	3.52 (0.37)	0.55 (0.08)	82.25 (1.06)
<i>O.heliabravoana</i>	3.97 (0.02)	0.95 (0.06)	16.99 (0.57)	3.02 (0.11)	2.10 (0.09)	72.97 (0.80)
<i>O. joconoxtle</i>	4.09 (0.19)	1.03 (0.11)	19.24 (0.45)	2.56 (0.22)	0.64 (0.02)	72.62 (0.76)
<i>O. ficus-indica.</i>	3.55 (0.09)	1.01 (0.08)	17.22 (0.46)	2.66 (0.14)	0.97 (0.01)	74.68 (0.56)

Con respecto a las grasas, algunos autores señalan que los contenidos de lípidos se encuentran presentes principalmente en el germen y la capa de aleurona del grano [18]. Los lípidos presentes en las semillas pueden servir como estabilizadores o desestabilizadores de formadores de espumas; cuando los lípidos están unidos a las proteínas tienden a estabilizar y mejorar la espuma, pero cuando se encuentran libres pueden disminuir la espuma. Los contenidos de proteínas en las especies de semillas, varían entre 0.55 y 2.10%, unas 2-6 veces menos que en los granos de cereales; son valores bajos como valor alimentario. Esto es debido a la fuerte interacción entre el genotipo y las condiciones ambientales que prevalecen durante el desarrollo y maduración del fruto y con ello la semilla.

A partir de los carbohidratos totales y por los análisis de azúcares reductores y sacarosa, se estimó los contenidos de almidones [14]. En la tabla 3 se observan los resultados. La estimación de los contenidos de almidones es admisible por cuanto de manera gráfica se puede observar en la figura 6, la excelente correlación lineal entre % CHOS y % de almidones. Por los contenidos en almidones y azúcares podrían señalarse dos agrupaciones como las reflejadas en la figura; las especies con más de 75 % de almidones y de carbohidratos (*O. matudae* y *C. imbricata*) y las especies con contenidos menores de 75% (las restantes). Los más altos valores de azúcares y sacarosa los presentó la especie *O. joconoxtle* , lo cual es congruente con el hecho de que esta especie se utilice para el consumo fundamentalmente en dulces o elaboración de postres. Son también importantes los contenidos de almidones que se aprecian en las cinco especies.

Tabla 3. Resultados de los análisis proximales. Azúcares y almidones. Entre paréntesis se muestran los resultados de la desviación estándar

Cultivo	%CHOS	% Az Red	% Sacarosa	% Almidones
<i>O. matudae</i>	79.51 (0.37)	4.25 (0.04)	0.87 (0.01)	74.39 (0.42)
<i>C. imbricata</i>	82.25 (1.06)	3.52 ((0.10)	0.72 (0.02)	78.01 (1.19)
<i>O. heliabrav</i>	72.97 (0.80)	3.42 (0.01)	0.7 (0.02)	68.85 (0.83)
<i>O. joconoxtle</i>	72.62 (0.76)	5.3 (0.49)	1.08 (0.07)	66.24 (1.32)
<i>O. ficus-indica.</i>	74.68 (0.56)	4.16 (0.13)	0.85 (0.02)	69.67 (0.71)

Los resultados de concentraciones totales de metales bioacumulados inicialmente en las semillas de las cinco especies estudiadas se muestran en la tabla 4. Con relación a elementos esenciales como el calcio, magnesio y el potasio, se obtuvo los niveles más elevados como suma de éstos, en las especies *O. heliabravoana* y *O. ficus-indica*.

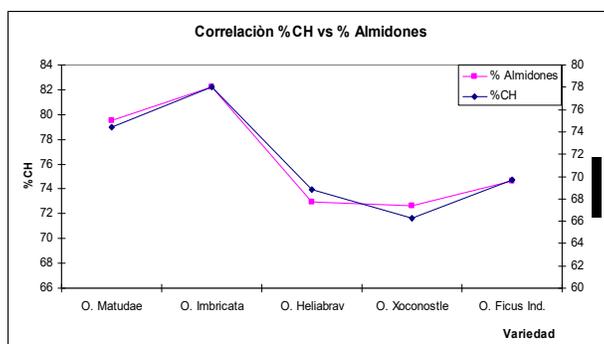


Figura 6. Correlación de contenidos de CH y almidones en especies de semillas

Tabla 4. Contenidos de metales y elementos tóxicos en las semillas estudiadas

Metales	mg/Kg				
	<i>O. matudae</i>	<i>C. imbricata</i>	<i>O. heliabravoana</i>	<i>O. joconoxtle</i>	<i>O. ficus-indica</i>
Al	5.373	7.187	7.317	5.555	2.484
Cd	<0.0026	<0.0026	<0.0026	<0.0026	<0.0026
Ca	362.950	345.840	809.820	251.490	736.44
Cr	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	8,012
Pb	42.290	45.229	70.791	43.996	21.346
Mg	2096.398	1938.458	2159.458	2990.760	1431.201
K	174.696	265.018	283.228	178.556	239.723
Na	3.294	6.057	4.701	3.314	3.627
Zn	<0.0014	15.496	<0.0014	<0.0014	<0.0014
As	0.652	0.864	1.561	1.259	0.608
Hg	<0.0024	<0.0024	<0.0024	<0.0024	<0.0024
Totales	2685.65	2624.15	3336.88	3474.93	2443.44
% Total	0.27	0.26	0.33	0.35	0.24

En general estos tres elementos constituyen entre el 97.15% y 98.50% del total de metales encontrados en las semillas de las cinco especies evaluadas; todo ello pudiera ser una evidencia de estos cultivos han sido cosechados en suelos calcáreos sobre todo en la especie *O. joconoxtle* en la que se obtuvo más bajo calcio con respecto a las otras dos; sus elevados contenidos de magnesio reflejan suelos dolomíticos [3]. El calcio es un elemento esencial para el crecimiento de meristemas y particularmente para el crecimiento y funcionamiento apropiado de los ápices radicales de las plantas. Tiene la función de impedir daños a la membrana celular, evitando el escape de sustancias intracelulares, cumpliendo un papel estructural al mantener la integridad de la membrana). El magnesio por otra parte, es absorbido y traslocado en la planta como ión divalente; forma parte del sistema enzimático y activa funciones metabólicas. Es constituyente estructural de las proteínas, sin embargo en este estudio, podría decirse que por los bajos índices de proteínas encontrados en las especies de semillas evaluadas, no debe estar el magnesio necesariamente vinculado a la estructuración de las mismas, sino tal vez su principal función esté ligada a la evolución de oxígeno en la fotosíntesis.

Los tipos de suelo donde fueron cultivados estas *Opuntias*, con seguridad, tienen mayores cantidades de dolomita como fuente de calcio y magnesio que los suelos francamente arenosos en los cuales se suelen cultivar por requerir menores niveles de regadío. Por los contenidos de oligoelementos como el aluminio y el sodio se debe destacar que en todas las especies están presentes notándose que resulta ligeramente más elevado el Al que el Na, con la excepción de la especie *O. ficus-indica* donde el Na resultó relativamente más elevado que el Al. Por su parte el zinc, no fue detectado en ninguna muestra, lo que puede indicar un déficit de este elemento en estos suelos [3], con la excepción de la especie *C. imbricata* donde su contenido es elevado lo que puede asociarse a la aplicación de algún tipo de fertilizante en esos suelos. Los contenidos de Al y Na son comparables con los valores de suelos calcáreos con presencia de arcillas.

El sodio estimula el crecimiento a través del alargamiento celular y puede sustituir al potasio como un soluto osmóticamente activo. El potasio es uno de los elementos esenciales en la nutrición de la planta y uno de los tres que se encuentra en pequeñas cantidades en los suelos, limitando el rendimiento de los cultivos. Altas concentraciones de potasio se requieren para la conformación activa de muchas enzimas que participan en el metabolismo. Concentraciones abundantes de potasio son necesarias para neutralizar los aniones solubles y macromoleculares del citoplasma, que tiene pocos cationes orgánicos. De ésta forma contribuye en gran medida con el potencial osmótico. Es por esta razón que el potasio se encuentra en mayor concentración que el resto de los minerales considerados como oligoelementos en las semillas evaluadas. Por otra parte, es importante señalar que las plantas pueden acumular elementos traza que son tóxicos, sin embargo, su capacidad de acumulación es limitada, por lo que se consideran como los reservorios intermedios a través de los cuales estos elementos son transferidos desde sus fuentes primarias a otros organismos [13]. Se puede observar la ausencia de elementos tóxicos tales como cadmio y mercurio; con referencia al cromo sólo se observó presencia en la especie *O. ficus-indica* en valores por debajo de los permitidos en granos de semillas (por ejemplo para cereales como el trigo o el sorgo) que tienen alguna función comestible [19]. Con respecto a los contenidos de arsénico debe señalarse que a pesar que en México no existe una normatividad que especifique contenidos permisibles de este elemento en productos con alguna función alimentaria o simplemente en granos o semillas de frutos, puede hacerse referencia a una normatividad Argentina que establece que un grano se considera contaminado con arsénico si sus contenidos rebasan 0.2 mg/kg en base seca [20]. Con base a esta norma puede señalarse que en todos los casos los contenidos de As en las semillas de las diferentes especies, exceden a esta norma en 3 a 7 veces; esto podría ser una invalidante para que a partir de estas semillas pueda elaborarse algún producto alimenticio con valor agregado. Sin embargo, los contenidos observados en plomo si se consideran elevados por lo cual es de esperar que en otras

partes del fruto (pulpa y corteza) que son consumibles y forman parte de la dieta tradicional mexicana, sean aún más significativos y peligrosos. Las normas mexicanas, NMX-FF-043-SCFI-2003, [11] y la Comisión del Codex Alimentarius fijan como límite máximo 0.05 mg/100g de plomo en general para alimentos, FAO/OMS, 2001 [21] y el límite máximo que marca la Unión Europea en granos de cereales es de 0.02 mg/100 g.

De los resultados del análisis de tamaño y distribución de partículas se resaltan por sus tamaños promedios y que varían entre 23.81 y 55.13 μm . En este sentido la especie *O. joconoxtle* es la de mayores tamaños y la *O. heliabravoana* la de diámetros más pequeños, sin embargo ambas presentan una gran variabilidad en distribución de tamaños (tabla 5) en comparación con la especie *O. ficus-indica* o la especie *O. imbricata*. La morfología de las partículas que se muestran en la figura 7 a, b, c, d y e, corresponde a las partículas observadas al microscopio en los cortes longitudinales en las semillas.

Tabla 5. Distribución y tamaños de partícula promedios

Cultivo	Tamaños de Partícula			
	Tam Part (μm)	%<0.452 (μm)	Desde (μm)	Hasta (μm)
<i>O. heliabravoana</i>	23.810	0.540	0.102	863.900
<i>O. xoconostle</i>	55.130	0.086	0.412	1143.000
<i>O. ficus-indica</i>	31.500	0.092	0.410	234.000
<i>O. matudae</i>	45.750	0.435	0.422	872.500
<i>C. imbricata</i>	34.580	0.099	0.166	189.500

Se puede observar la presencia de gránulos de almidón formando agregados o agrupaciones y todas ellas se asemejan entre sí de alguna manera y que sólo en el caso de la especie de *O. ficus-indica* se puede notar alguna diferencia del resto de las especies.

Por los resultados de los ensayos de cinética de bioadsorción para Cadmio y Manganeso, en la figura 8 a y b se puede observar que para los tres valores de pH el tiempo de contacto óptimo es de 18 horas y es a pH 4 donde se produce la máxima adsorción.

Los resultados encontrados de bioadsorción en columnas se observan en las figuras 9 y 10 para Mn y Cd respectivamente. No se evaluó la especie *O. joconoxtle* por cuanto no se dispuso de suficiente material. Partiendo de disoluciones conteniendo Mn^{2+} y Cd^{2+} a concentraciones iniciales de 0.50 mg/L, se alcanzaron para el manganeso eficiencias entre 86.3% y 92.8% (figura 9). La máxima eficiencia la presentó la especie *O. ficus-indica*, superando el 80% de eficiencia a partir de la segunda fracción de agua contaminada que pasa por la columna empacada. Se entiende por fracción de agua pasada por la columna al paso de 100 mL de disolución conteniendo los iones a través del empaque de 25 mL de las semillas en polvo del empaque.

Se alcanzó el máximo luego de seis fracciones, a partir de ahí comenzó a disminuir la eficiencia indicando la saturación en términos de bioadsorción de Mn^{2+} . Las restantes especies demoraron entre 3 y 4 fracciones para alcanzar el 80% de eficiencia pero además, como la especie *O. heliabravoana*, alcanza el 86 % de eficiencia en la 4 fracción e inmediatamente cae su eficiencia. Para el Cd^{2+} por su parte (figura 10), se pudo apreciar en primera instancia eficiencias entre 51.8% y 66.3%, mucho más bajas que para el Mn, lo cual es indicativo de la menor afinidad por parte de estas especies de *Opuntias* hacia este elemento.

En este caso fueron las especies *O. matudae* y *C. imbricata* las que mejores resultados mostraron. Para todos los casos se evaluaron hasta 9 fracciones de disoluciones (900 ml pasados a través de las columnas empacadas). Los valores mostrados corresponden a los promedios de tres réplicas. Comparando los niveles de Mn^{2+} y Cd^{2+} se hace notar que todas las especies retienen mucho más Mn^{2+} que Cd^{2+} , desde 358.5 mg/kg hasta 401.0 mg/kg y desde 267.7 mg/kg hasta 371.9 mg/kg, respectivamente. Es la especie *O. heliabravoana* la que menos retiene de ambos metales.

Posteriormente se evaluó el proceso de desorción de los metales desde las columnas saturadas. Para ello se les hizo pasar una solución de HCL 0.50 M y las fracciones de salida se evaluaron cada 50 mL de elución. Los resultados finales arrojaron la prácticamente imposibilidad de regenerar estas biomásas, es decir es prácticamente muy difícil poder eluir los metales una vez que han sido adsorbidos. Correspondió a la especie *O. heliabravoana* los mayores valores de DPH, mayor dureza o resistencia a la abrasión, así como el menor volumen de la semilla. Indica la estructura más sólida y compacta, sugiere la idea de ser poco porosa. La especie *O. joconoxtle* presentó el mayor valor de DPMG, menor resistencia a la abrasión y menor DIF, indica semillas más blandas, más pesadas y poco porosas.

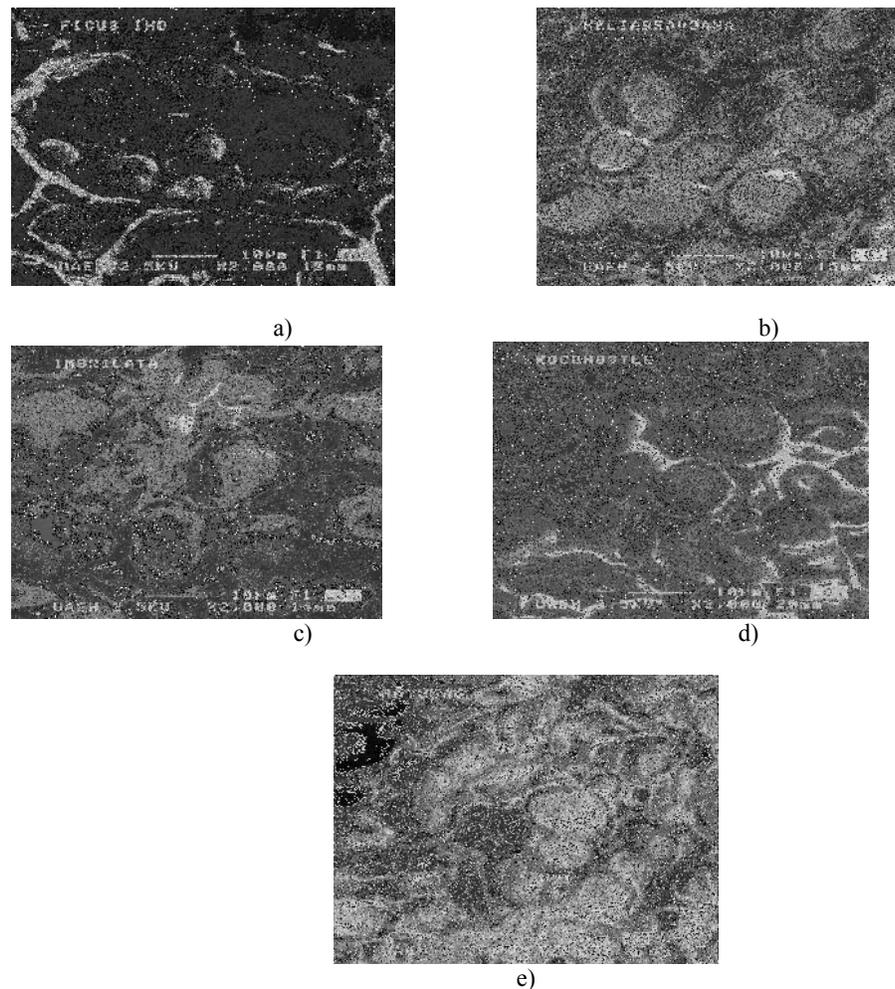


Figura 7. Morfología del endospermo de las semillas de Opuntias. a) *O. ficus-indica*, b) *O. heliabravoana*, c) *C. imbricata*, d) *O. joconoxtle* y e) *O. matudae*

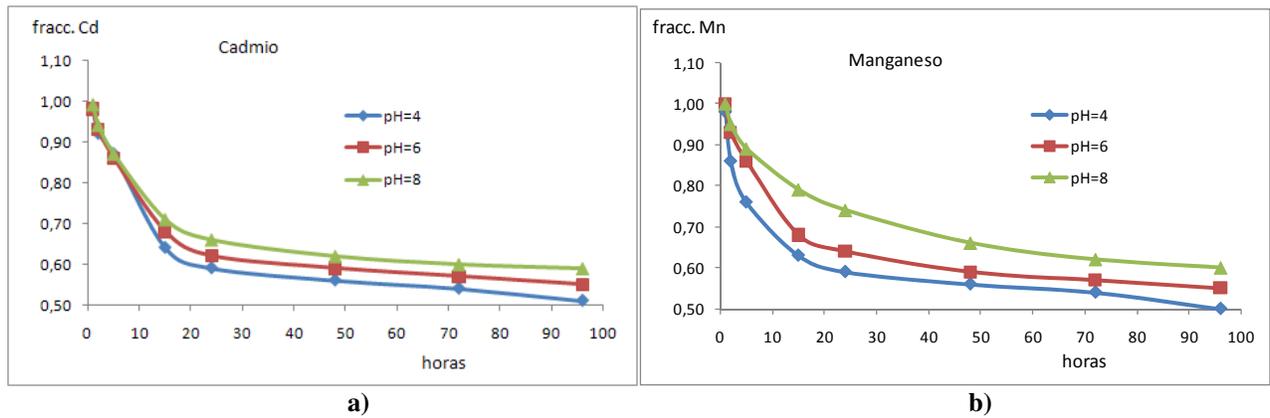


Figura 8. Cinética de adsorción para determinar tiempo de contacto. A) Cadmio b) Manganese

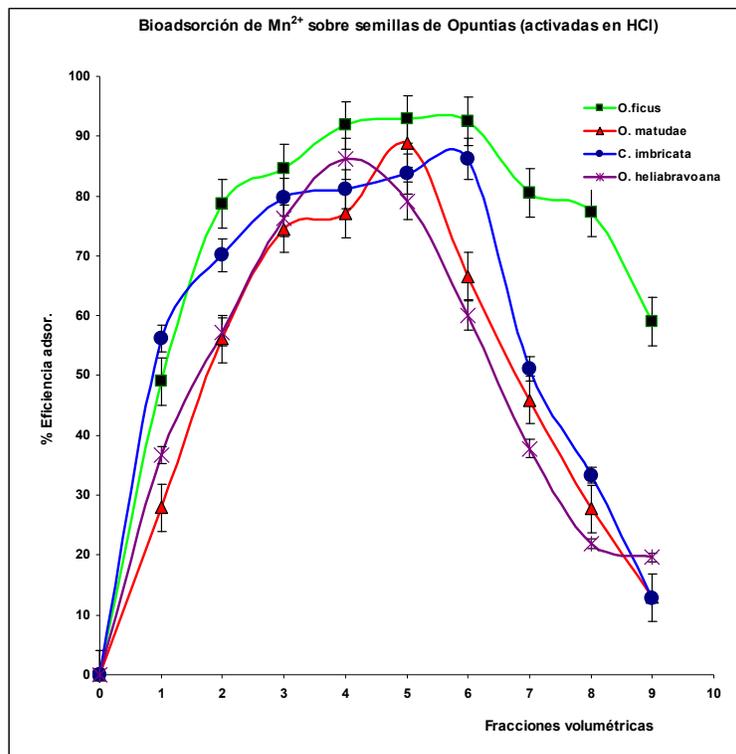


Figura 9. Porcentajes de eficiencia de eliminación de Manganese en el medio acuoso por especies de *Opuntias* (activadas en medio ácido) estudiadas

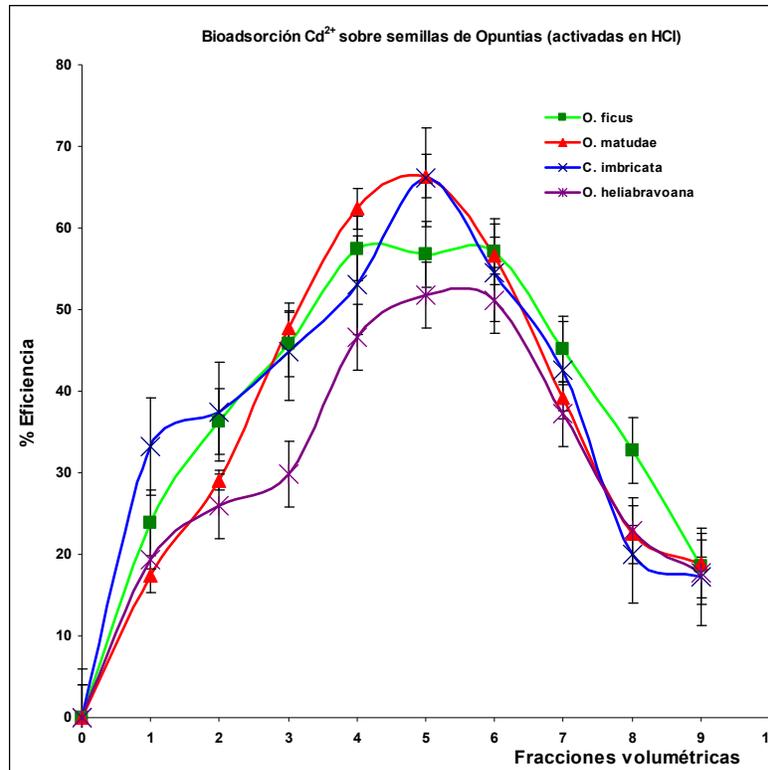


Figura 10. Porcentajes de eficiencia de eliminación de Cadmio en el medio acuoso por especies de *Opuntias* (activadas en medio ácido) estudiadas

CONCLUSIONES

De todo este estudio se ha podido concluir que las dimensiones y tamaños (corte longitudinal) de las semillas en orden decreciente fue *C. imbricata*, *O. ficus-indica*, *O. joconoxtle*, *O. matudae* y *O. heliabravoana*. El espesor del pericarpio (cáscara) fue en orden igualmente decreciente por especies *C. Imbricata*, *O. ficus-indica*, *O. matudae*, *O. joconoxtle* y *O. helabravoana*. El más rugoso y de apariencia más fibrosa corresponde a la especie *C. imbricata*. De la observación de los endospermos, la especie *C. imbricata* presentó poco volumen, no muy compacto lo que puede indicar bajo peso específico. La especie *O. heliabravoana*, la más pequeña, mostró un endospermo relativamente voluminoso y compacto lo que representa un elevado peso específico.

Sobre los resultados del análisis proximal, las cinco especies presentaron niveles similares en humedad y contenido de cenizas, clasificados como bajos. Por los contenidos en fibra bruta total y carbohidratos las hacen similares. Las cinco especies presentan significativos porcentajes en grasas, destacándose por los más altos valores la especie *O. joconoxtle*. Los contenidos de proteínas resultaron bajos por lo que no las hacen de interés en la industria alimentaria, salvo por sus altos contenidos en grasas, carbohidratos y almidones. Por los contenidos en almidones y azúcares podrían señalarse dos agrupaciones: las especies con más de 75% de almidones y de carbohidratos (*O. matudae* y *C. imbricata*) y las especies con contenidos menores de 75% (las restantes).

Sobre los resultados del análisis de metales, los elementos esenciales como calcio, magnesio y potasio, se encontraron en altos los niveles. En general estos tres elementos constituyen entre el 97.15% y 98.50% del total de metales. Por los contenidos de oligoelementos como aluminio y sodio, se encontraron dentro de los límites normales para plantas verdes, para el caso del zinc sólo fue detectado

en la especie *C. Imbricata*, lo que indica un déficit de este elemento en los restantes suelos. Se observó la ausencia de elementos tóxicos tales como cadmio y mercurio. Por los contenidos de arsénico se pueden considerar como contaminadas ya que sus contenidos rebasan 0.2 mg/kg en base seca. También los contenidos en plomo se consideran elevados. Serían una invalidante para que a partir de estas semillas pueda elaborarse algún producto alimenticio. Sobre los resultados de tamaños de partículas y microscopía electrónica los tamaños promedios de partículas variaron entre 23.81 y 55.13 μm . Se observó presencia de gránulos de almidón formando agregados o agrupaciones y todas ellas semejantes entre sí.

Sobre el proceso de adsorción de Mn y Cd, de las especies en estudio, se puede concluir que muestran mayor selectividad por bioadsorber Mn que Cd. Se alcanzaron para el manganeso eficiencias de bioadsorción entre 86.3% y 92.8% y para el cadmio eficiencias entre 51.8% y 66.3%, mucho más bajas que para el manganeso. La máxima eficiencia la presentó la especie *O. ficus-indica* seguido de la especie *O. matudae* para el Mn en tanto que para el Cd la especie *O. matudae*, seguida de la especie *C. Imbricata*. El proceso de desorción resulta inviable en todos los casos por lo cual se concluye que estas biomásas no son regenerables en el caso de los metales Mn y Cd.

BIBLIOGRAFÍA

1. B. Volesky, "Removal and recovery of heavy metals by biosorption", (*Biosorption of heavy metals*. Boston, USA, CRC press, 1990), pp. 7-43.
2. B. Volesky, "Biosorption Of Cd And Cu By Different Types Of Sargassum biomass", (AMILS, R. and BALLESTER, A. eds. *Biohydrometallurgy and the Environment towards the mining of 21st century*, part B.: International Biohydrometallurgy Symposium-Proceedings. Amsterdam, Elsevier, 1999), pp. 473-482.
3. H. F. Martínez, "Estudio de la acumulación de los metales pesados en cultivos de secano, en el distrito de riego 03 del valle del Mezquital", Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, 2002.
4. I. Acosta, M.G. Moztezuma-Zárate, J.F. Cárdenas, C. Gutiérrez, "Bioadsorción de Cadmio (II) en Solución Acuosa por Biomásas Fúngicas", *Información Tecnológica* 18(1), 2007, pp. 9-14.
5. A. Díaz, J. Arias, G. Gelves, A. Maldonado, D. Leverde, J. Pedraza, H. Escalante, "Biosorción de Fe, Al y Mn de drenajes ácidos de amina de carbón empleando algas marinas *Sargassum* sp en procesos continuos", *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 1(30), 2003, pp. 34-48.
6. H. Dávila-Reyes, M. Garza-González, M. Cantú-Cárdenas, I. Balderas-Rentería, "Clonación molecular del gen de la metalotioneina I de ratón *Escherichia coli* y su aplicación en la remoción de metales pesados", *Revista de la Facultad de Salud Pública y Nutrición*, 1(10), 2004.
7. F. Prieto-García, S. Filardo-Kerstup, A.D. Román-Gutierrez, M.A. Méndez-Marzo, E. Pérez-Cruz, "Caracterización fisicoquímica de semillas de *Opuntias* (*O. Imbricata* sp. y *O. Matudae* sp.) cultivadas en el Estado de Hidalgo, México", *Revista Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*, Colombia, 27(1), 2008, pp. 76-84.
8. D. Granados-Sánchez, A.D. Castañeda-Pérez. *El nopal. Historia, fisiología, genética e importancia frutícola*, (1era Edición, Trillas, 1991) pp. 5-136.
9. AOAC. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist.* (Volumen II. Edited by Kenneth Herlich, 1995b). pp. 777-778, 1110.
10. AOAC. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist.* (Volumen I. Edited by Kenneth Herlich, 1995a), pp. 78-79, 237, 247, 272.

11. NMX-FF-043-SCFI-2003, “*Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereal-cebada maltera*” (*Hordeum vulgare* L.; *Hordeum distichum* L Norma Mexicana. Especificaciones y métodos de prueba, 2003)
12. R.N. Camacho, G.M. Díaz, H.M. Santillo, M.O. Velásquez, “*Productos de cereales y leguminosa*” (Manual de prácticas. Facultad de Química. UNAM, México, DF, 2001), pp.1-12; 40-46.
13. E. Pérez, “Estudio comparativo de composición química de semillas de *O. imbricata*, *O. matudae*, *O.heliabravoana*, *O. joconoxtle* y *O. ficus indica*”, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005, pp. 54.
14. M.A. Blanco, M. A. Montero, M. Fernández, “Composición química de productos alimenticios derivados de trigo y maíz elaborados en Costa Rica”, *Revista Archivos Latinoamericanos de Nutrición. ALAN. Vol. 50, N° 1, Caracas, Venezuela, 2000, p.62-74.*
15. BOE, *Orden de 27 de abril de 1988 por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis de zumos*, 1988.
16. H. D. Tscheuschner, *Fundamentos de tecnología de los alimentos*, (Editorial Acribia. Zaragoza, España, 2001), pp. 14.
17. D. A. V. Dendy, B. J. Dobraszczyk, *Cereales y productos derivados, Química y tecnología*. (Ed. Acribia. Zaragoza, España, 2004), pp. 403-421.
18. G. M. J. Callejo, *Industrias de cereales y derivados*, (Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, 2002). pp. 21-23, 25-36,169-175.
19. S. S. R. Serna, *Química e industrialización de los cereales*, (AGT Editor. México, D. F. 2001), pp. 3-23, 47-73 y 79-89.
20. A. Kabata-Pendias, H. Pendias, *Trace elements in Soils and Plants*, (CRC Press LLC, Third Edition, USA, 2000), pp. 27.
21. FAO/OMS, *Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias*, (Comisión del Codex Alimentarius. ALINORM 01/14, 2-7 de Julio, 24° Periodo de sesiones. Ginebra, 2001), pp. 2.